

В. Л. БЕРЕЗИН, А. Ф. СУВОРОВ

# СВАРКА ТРУБОПРОВОДОВ И КОНСТРУКЦИЙ

ИЗДАНИЕ ВТОРОЕ,  
ПЕРЕРАБОТАННОЕ И ДОПОЛНЕННОЕ

**Д О П У Щ Е Н О**

*Министерством высшего и среднего  
специального образования СССР  
в качестве учебника для студентов вузов,  
обучающихся по специальности  
«Сооружение газонефтепроводов,  
газохранилищ и нефтебаз»*



МОСКВА «НЕДРА» 1983

**Березин В. Л., Суворов А. Ф.** Сварка трубопроводов и конструкций. Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. М., Недра, 1983, 328 с.

Изложены теоретические основы и технология сварочных процессов, применяемых при сооружении газонефтепроводов, газохранилищ и нефтебаз.

Во второе издание книги (1-е изд.— 1976) внесены дополнительные материалы по технике безопасности при газовой и плазменно-дуговой сварке металлов.

Для студентов нефтегазовых вузов, обучающихся по специальности «Сооружение газонефтепроводов, газохранилищ и нефтебаз».

Табл. 32, ил. 175, список лит.— 21 назв.

Рецензент — кафедра сооружения трубопроводов и хранилищ ИФИНГ

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Одно из ведущих мест в транспортной системе СССР принадлежит трубопроводному транспорту, который приобрел самостоятельное хозяйственное значение. «Основные направления экономического и социального развития СССР на 1981—1985 годы и на период до 1990 года» предусматривают ускоренно развивать трубопроводный транспорт. Одновременно с дальнейшим развитием трубопроводного строительства в одиннадцатой пятилетке будет осуществлен переход к сооружению газопроводов, рассчитанных на давление 10 МПа, а в дальнейшем на давление 12 МПа. В решении этих задач важным звеном является дальнейшее усовершенствование сварочного процесса.

Для соединения труб большого диаметра разработана и внедрена автоматическая двусторонняя сварка поворотных стыков труб на трубосварочных базах. Значительный эффект при сварке достигается за счет специальной обработки кромок труб в трассовых условиях с целью уменьшения количества наплавленного металла. Кроме того, разработана и внедрена орбитальная сварка неповоротных стыков магистральных трубопроводов порошковой проволокой с принудительным формированием шва. Существенно повысились производительность ручной электродуговой сварки неповоротных стыков магистральных трубопроводов и темп сооружения трубопроводов за счет организации крупных бригад сварщиков и максимальной их специализации, способствующей улучшению качества.

Для соединения труб большого диаметра дальнейшее развитие получит электроконтактная сварка, которая позволит увеличить производительность сварочных работ в 3—5 раз по сравнению с производительностью при ручной электродуговой сварке. Развитие трубопроводного транспорта связано со строительством большого числа резервуарных парков, насосных и компрессорных станций. Для снижения трудоемкости выполнения горизонтальных швов стенки резервуара при полистовом методе монтажа все большее применение находит автоматическая сварка с полупринудительным формированием шва. Значительного снижения трудоемкости сварочных работ достигают при выполнении вертикальных швов стенки резервуара с применением автоматических устройств. Индустриальный метод применения автоматической сварки стенки, днища и крышки резервуара в заводских условиях позволяет сократить в 3—4 раза продолжительность строительно-монтажных работ на монтажной площадке.

## *Глава I*

### **ОСНОВНЫЕ СПОСОБЫ СВАРКИ ТРУБОПРОВОДОВ И РЕЗЕРВУАРОВ. ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СВАРОЧНОЙ ДУГИ**

#### **КЛАССИФИКАЦИЯ ОСНОВНЫХ СПОСОБОВ СВАРКИ ТРУБОПРОВОДОВ И РЕЗЕРВУАРОВ**

Сварка представляет собой процесс получения неразъемного соединения с применением раздельного или совместного приложения тепла и давления.

Существующие способы сварки могут быть разделены на две группы: сварка плавлением и сварка давлением (пластическая). В учебнике классифицированы способы сварки, имеющие практическое значение для трубопроводного и резервуарного строительства и, естественно, не отражены многие разновидности сварки, которые не имеют прямого отношения к строительству.

При сварке плавлением металлы нагреваются и связь между их атомами начинает ослабевать при определенной температуре, тело становится более пластичным, затем оно теряет свою форму и, наконец, переходит в жидкое состояние. При расплавлении возникает самопроизвольное перемешивание металлов, в процессе которого устанавливается их межуатомная связь, а при последующем понижении температуры происходит совместная кристаллизация. Для способов второй группы основным фактором в процессе сварки является давление, под действием которого происходит смятие «выступов», существующих на поверхности металла даже при любом способе механической обработки, и сближение свариваемых тел на расстояние, необходимое для возникновения межуатомного взаимодействия. В этом случае могут происходить процессы взаимной диффузии, а иногда частичной взаимной кристаллизации. Обе группы (сварка плавлением и сварка давлением) разделяются, в свою очередь, на ряд способов, которые получили или получают широкое применение в трубопроводном и резервуарном строительстве.

Классификация основных способов сварки изображена на рис. 1.



## ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ

Сварка плавлением осуществляется нагревом металла в месте соединения изделий до жидкого состояния. Источник энергии и способ преобразования ее в теплоту оказывают решающее влияние на размеры и форму шва, а также на механические свойства сварных соединений. Высокая химическая активность расплавленного металла делает в большинстве случаев недопусти-



Рис. 1. КЛАССИФИКАЦИЯ ОСНОВНЫХ СПОСОБОВ СВАРКИ

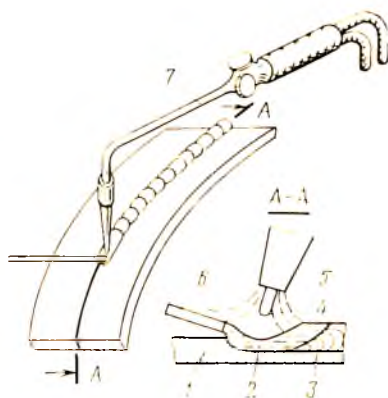


Рис. 2. ГАЗОВАЯ СВАРКА:

1 — свариваемые изделия; 2 — ванна жидкого металла; 3 — наплавленный металл; 4 — ядро пламени; 5 — ацетилено-кислородное пламя; 6 — присадочный пруток; 7 — газовая горелка

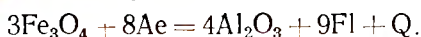
мым контакт жидкого металла с воздухом. Поэтому при сварке плавлением обеспечивают газовую, шлаковую или комбинированную защиту металла от воздуха.

### Сварка с использованием энергии химических реакций

Газовая сварка является одним из старых способов сварки труб. Сущность процесса заключается в нагреве кромок труб и присадочного металла ацетилено-кислородным пламенем (рис. 2). Ацетилено-кислородное пламя имеет температуру около  $3200^{\circ}\text{C}$ , что позволяет расплавлять металл и одновременно удерживать сварочную ванну в любых пространственных положениях. Процесс применяют для сварки поворотных и неповоротных стыков труб в основном малого диаметра. В качестве присадочного материала используют сварочную проволоку Св-08А диаметром 2—3 мм. Применение ацетилена

для сварки было предложено во Франции Ле-Шателье и Ш. Пикаром в 1901 г. Газовую сварку в СССР широко использовали при сооружении первых магистральных нефтепроводов и нефтепродуктопроводов в 1926—1935 гг. (Грозный—Туапсе, Баку—Батуми, Армавир—Трудовая, Гурьев—Орск). В настоящее время газовую сварку частично применяют при сооружении городских газопроводов диаметром до 150 мм и монтаже трубопроводов для контрольно-измерительных приборов на компрессорных и насосных станциях.

*Термитная сварка* основана на процессе металлотермии (восстановление металла из окисла с помощью другого металла). Процесс открыт русским химиком П. Н. Бекетовым в 1865 г. При сварке сталей в качестве термитов используют смесь порошков окислов железа (окалина) и алюминия. В процессе горения смеси идет реакция



Один килограмм смеси при сгорании выделяет около 3,1 МДж теплоты. Под ее воздействием восстановленное железо нагревается до температуры 2200—2400 °С, расплавляет стальную заготовку в тигле (рис. 3), перегретый металл частично оплавляет кромки свариваемых изделий и, затвердевая, образует шов. При сооружении магистральных трубопроводов термитную сварку плавлением используют для приварки контактов к трубопроводу при установке электрохимзащиты.

### Сварка с использованием электрической энергии

*Электродуговую сварку* металлическим электродом применяют при сооружении магистральных трубопроводов с 1936 г., а годом позже — для сооружения резервуаров. Сварку можно выполнять вручную, а также с помощью полуавтоматов и автоматов. При ручной сварке электрод установлен в держателе, который находится в руке сварщика. Поддержание электрической дуги, перемещение ее вдоль стыка и подачу присадочного материала осуществляет сам сварщик. При полуавтоматической сварке электрод подается механизмом, а поддерживает электрическую дугу и перемещает ее сварщик. При автоматической сварке все перечисленные операции выполняют механизмы или автоматические устройства.

*Сварка стержневым плавящимся электродом* (рис. 4) с нанесенным на него покрытием выполняется вручную. Покрытие содержит вещество, обеспечивающее газовую и шлаковую защиту металла от воздуха и физико-химическую обработку наплавленного металла. Физико-химическая обработка жидкого металла в процессе сварки впервые предложена и опробована Н. Г. Славяновым, а первые электроды с покрытием были созданы Н. Н. Бенардосом.

До 1937 г. ручную дуговую сварку трубопроводов выполняли электродами с тонкой меловой обмазкой. Механические свойства сварных соединений были ниже, чем свойства основного металла. С 1937 г. начали широко применять на трассе и сооружениях резервуаров электроды с толстым покрытием, что дало возможность получить сварные соединения равнопрочные с основным металлом и значительно повысить производительность сварочных работ по сравнению с газовой сваркой. Сварку стержневыми электродами с толстым покрытием можно выпол-

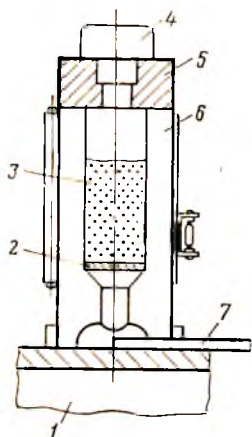


Рис. 3. ТЕРМИТНАЯ СВАРКА:

1 — трубопровод; 2 — заслонка; 3 — термитная смесь; 4 — жидкая окись алюминия-шлак; 5 — графитная крышка; 6 — тигель; 7 — стальной проводник

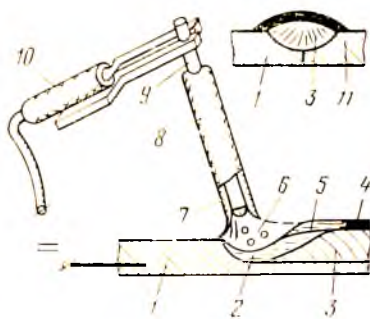


Рис. 4. РУЧНАЯ ЭЛЕКТРОДУГОВАЯ СВАРКА ЭЛЕКТРОДОМ С ТОЛСТЫМ ПОКРЫТИЕМ:

1, 11 — свариваемые изделия; 2 — жидкий металл; 3 — наплавленный металл; 4 — шлаковая корка; 5 — слой жидкого шлака; 6 — электрическая дуга; 7 — обмазка электрода; 8 — электрод; 9 — стержень электрода; 10 — электродедержатель

нять также и механизированными способами: сварка наклонным, свободно опертым об изделие электродом (гравитационная), сварка лежачим электродом с магнитным воздействием на дугу и др.

Сварку под слоем флюса выполняют с помощью полуавтоматов и автоматов (рис. 5). Отличительные особенности этой разновидности дуговой сварки следующие: применение голый электродной проволоки, подаваемой в зону сварки из кассеты; обеспечение токопровода к электроду вблизи дуги; горение дуги в газовом пузыре, защищаемом от воздуха слоем расплавленного флюса-шлака и твердого флюса; защита сварочной зоны от вредного излучения дуги. Первые два фактора способствуют резкому увеличению плотности сварочного тока по сравнению с ручной сваркой, что позволяет увеличить производительность наплавки электродного металла.

Идея применения сварки с использованием специальных порошков-флюсов принадлежит Н. Г. Славянову. В 1929 г. советский инженер Д. А. Дульчевский предложил способ автоматической сварки меди под слоем порошкообразных горючих веществ. Сварка под флюсом была разработана Институтом электросварки им. Е. О. Патона (ИЭС) и получила применение в промышленности в 1938—1940 гг. Внедрение автоматической сварки под флюсом в трубопроводном строительстве позволило

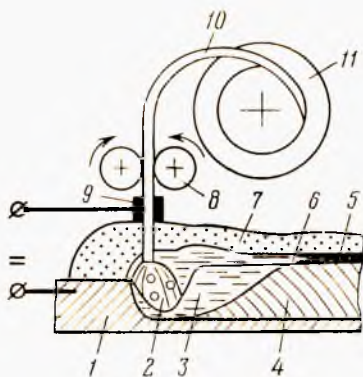


Рис. 5. АВТОМАТИЧЕСКАЯ СВАРКА ПОД СЛОЕМ ФЛЮСА:

1 — свариваемые изделия; 2 — электрическая дуга; 3 — жидкий металл; 4 — наплавленный металл; 5 — шлаковая корка; 6 — жидкий шлак; 7 — нерасплавленный флюс; 8 — ролики подачи электрода. 9 — подвод тока; 10 — сварочная проволока; 11 — кассета с электродной проволокой

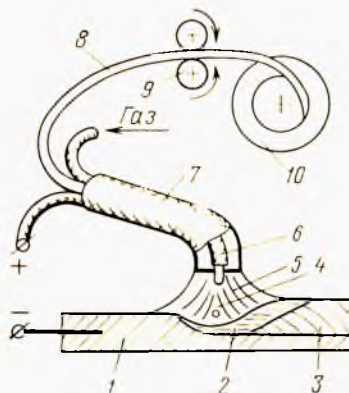


Рис. 6. ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКАЯ СВАРКА ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ В СРЕДЕ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА:

1 — свариваемое изделие; 2 — жидкий металл; 3 — наплавленный металл; 4 — электрическая дуга; 5 — струя защитного газа; 6 — токопровод; 7 — горелка; 8 — сварочная проволока; 9 — ролики подачи электрода; 10 — кассета с электродной проволокой

в 2 раза увеличить производительность сварочно-монтажных работ. Этот способ впервые применили при строительстве газопровода Дашава — Киев в 1948 г. Применение автоматической сварки под флюсом для сооружения магистральных трубопроводов позволяет добиться уровня механизации сварочных работ до 50 %.

Электродуговую сварку в среде защитных газов изобрел Н. Н. Бенардос. По его предложению защита от воздуха сварочной ванны осуществлялась светильным газом. В период второй мировой войны в США нашла применение сварка в среде аргона и гелия неплавящимся вольфрамовым электродом и плавящимися электродами (рис. 6). В 1952 г. К. В. Любавским и Н. М. Новожиловым была изобретена проволока, использование которой в сварочном процессе позволило осуществить сварку плавящимся электродом в среде углекислого газа.

Основное преимущество процесса сварки в среде защитных газов заключается в повышении вязкости расплавленного металла, что позволяет сваривать стыковые швы на весу и механизировать сварку неповоротных стыков в разных пространственных положениях. Для сооружения магистральных трубопроводов сварку в среде углекислого газа начали применять в 1959 г.

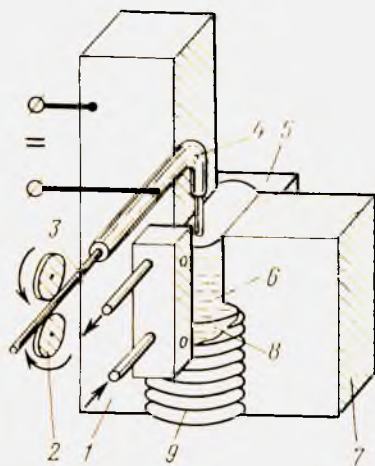


Рис. 7. ЭЛЕКТРОШЛАКОВАЯ СВАРКА:

1, 7 — свариваемые изделия; 2 — ролики подачи электрода; 3 — сварочная проволока; 4 — мундштук; 5 — медные, охлаждаемые водой, формирующие ползуны; 6 — ванна расплавленного шлака; 8 — ванна жидкого металла; 9 — сварной шов

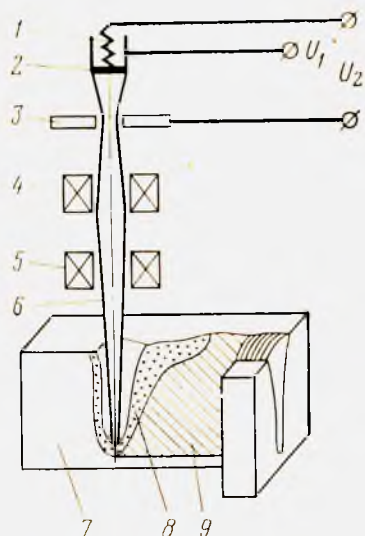


Рис. 8. ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВАЯ СВАРКА:

1 — катодный подогреватель; 2 — катод; 3 — анод; 4 — фокусирующая магнитная линза; 5 — отклоняющая магнитная система; 6 — электронный луч; 7 — свариваемый металл; 8 — ванна жидкого металла; 9 — наплавленный металл

При помощи сварки в среде  $\text{CO}_2$  плавящимся электродом сваривают первый (корневой) слой шва поворотных стыков на трубосварочных базах, а также полностью сваривают неповоротные стыки на трассе.

Электрошлаковая автоматическая сварка предложена в 1949 г. в ИЭС им. Е. О. Патона (рис. 7). В этом способе сварки энергия электрического тока преобразуется в теплоту при прохождении тока через ванну расплавленного шлака (в соответствии с законом Джоуля—Ленца). Формирование шва и удержание от вытекания жидкого шлака и металла осуществляется принудительно с помощью медных, охлаждаемых водой ползунов. Сварку выполняют, как правило, за один проход на всю толщину листа независимо от ее величины. Электрошлаковая сварка применяется в СССР и Японии при



монтаже резервуаров большой емкости. Этот процесс также используют на строительных площадках в качестве механизированного способа сварки арматуры железобетонных конструкций.

Сварка с принудительным формированием шва разработана также в ИЭС им. Е. О. Патона в 1947—1949 гг. В основу способа положен принцип искусственного охлаждения свободных поверхностей сварочной ванны, что позволяет сваривать швы, расположенные на вертикальной и наклонной поверхностях, а в ряде случаев — потолочные и полупотолочные швы. Процесс сварки осуществляется с применением формирующих уст-

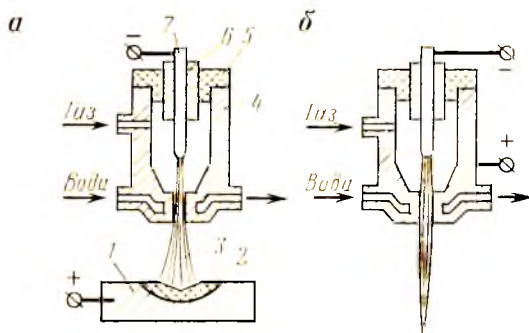


Рис. 9. ПЛАЗМЕННАЯ СВАРКА:

*а* — дуга прямого действия; *б* — дуга косвенного действия; 1 — свариваемый металл; 2 — ванна жидкого металла; 3 — струя плазмы; 4 — корпус горелки; 5 — изолятор; 6 — токоподвод; 7 — неплавящийся электрод

роЙств (ползунов), охлаждаемых водой, или устройств, не требующих искусственного охлаждения. Сварка с принудительным формированием шва используется при монтаже резервуаров большой вместимости, а также для выполнения неповоротных стыков магистральных трубопроводов.

Электронно-лучевая сварка разработана в начале 50-х г. во Франции (рис. 8). Сварка проводится с помощью потока электронов, имитируемых горячим катодом и ускоряемых электрическим полем (между катодом и анодом) напряжением 100—150 кВ. Электроны собираются в луч диаметром 0,5—1,5 мм с помощью системы магнитных линз и направляются на свариваемый стык. При бомбардировке твердого тела более 90 % кинетической энергии электронов переходит в тепловую, обеспечивая температуру 5000—6000 К в месте соударения потока электронов с металлом. Сварка проводится в вакууме ( $1,33 \cdot 10^{-3}$  Па) при удельной мощности до  $10^7$  МВт/м<sup>2</sup> путем перемещения электронной пушки вдоль неподвижных кромок или при помощи отклонения луча магнитной системой.

Промышленные электронно-лучевые установки применяют для сварки в заводских условиях продольных и спиральных швов труб. Во Франции проводят подводную электронно-лучевую сварку трубопроводов на глубине 300—3000 м, диаметром менее 600 мм с толщиной стенки до 30 мм.

*Дуговая сварка порошковой проволокой* разработана в ИЭС им. Е. О. Патона. Порошковая проволока состоит из малоуглеродистой ленты, свернутой и протянутой в трубочку диаметром 2—3 мм, заполненную порошкообразным наполнителем. Наполнитель состоит из смеси минералов, руд, ферросплавов металлических порошков, химикатов и других материалов. Порошковые проволоки используют для сварки без защиты зоны плавления, а также для сварки в среде защитных газов, под флюсом, электрошлаковой. Порошковую проволоку применяют для полуавтоматической и автоматической сварки со свободным формированием шва, полупринудительного и принудительного формирования.

Механизированную сварку порошковой проволокой применяют при сооружении резервуаров и магистральных трубопроводов.

*Плазменная сварка* была предложена в 50-х г. в СССР. Для сварочного процесса используется теплота, заключенная в плазме дуги. Плазма генерируется в специальных горелках—плазмотронах. Применяется плазменная дуга прямого (рис. 9, а) и косвенного (рис. 9, б) действия. Для сварки применяется больше дуга прямого действия. Плазменная дуга горит между неплавящимся электродом и свариваемым изделием. В камеру при этом подают нейтральный газ (Аг, Не или др.), который ионизируется и для достижения температуры 16 000 °С сжимается струей защитного газа, подаваемого в мундштук вокруг корпуса горелки. В качестве защитного газа может применяться углекислый газ, аргон, гелий и др. Плазменную сварку применяют для соединения труб и продольных швов на трубах с толщиной стенки 2—7 мм.

### **ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ ДАВЛЕНИЕМ**

Как уже отмечалось, сварка давлением осуществляется между холодными или нагретыми в зоне соединения деталями при совместном их сжатии.

На свойства сварных соединений основное влияние оказывают температура нагреваемых кромок, время сварки (удержка деталей под давлением) и чистота поверхностей соединяемых деталей. Поэтому все существующие разновидности сварки давлением можно разделить на две группы. К первой группе относятся способы сварки давлением, у которых значительные объемы металла подвергаются нагреву. Для многих способов этой группы температура нагрева должна превы-

шать температуру рекристаллизации ( $0,4T_{пл}$  — для чистых металлов или  $0,6—0,9 T_{пл}$  — для сплавов, где  $T_{пл}$  — температура плавления металла по абсолютной шкале), для некоторых — местный нагрев должен осуществляться даже до  $T_{пл}$ . Вторая группа включает разные способы сварки давлением, которые могут осуществляться без предварительного нагрева соединяемых деталей. В этом случае может происходить кратковременное нагревание небольших объемов металла в процессе совместной пластической деформации.

### Сварка с высоким нагревом

Соединение металлов с применением высокого нагрева деталей и последующей их пластической деформацией используется около 3500 лет.

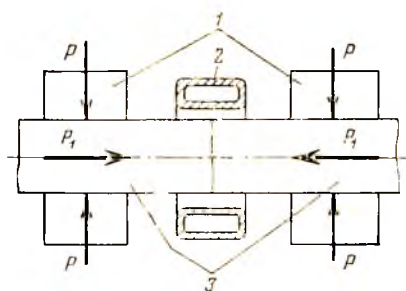


Рис. 10. ЭЛЕКТРОПРЕССОВАЯ СВАРКА:  
1 — зажимные устройства; 2 — индуктор;  
3 — трубы;  $P$  — усилие зажатия труб;  
 $P_1$  — усилие осадки

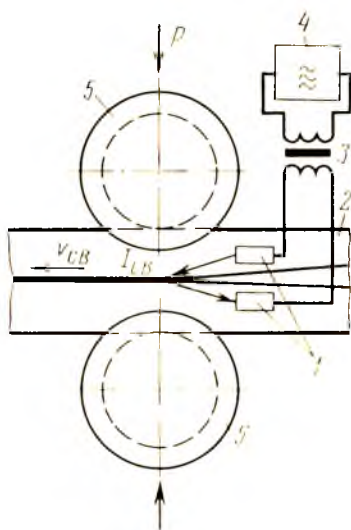


Рис. 11. СВАРКА С НАГРЕВОМ ТОКАМИ РАДИОЧАСТОТЫ:

1 — токоподвод; 2 — непрерывно движущаяся со скоростью  $v_{св}$  заготовка трубы; 3 — трансформатор; 4 — ламповый генератор; 5 — сжимающие ролики;  $P$  — усилие осадки;  $I_{св}$  — сварочный ток

**Газопрессовая сварка.** Кромки свариваемых труб нагревают при помощи кольцевых ацетилено-кислородных горелок до пластического состояния и сдавливают. Сварное соединение в этом случае не свободно от включения окислов, поэтому равнопрочности с основным металлом не достигается.

Дальнейшее развитие сварки давлением состояло в совершенствовании источников нагрева, методов пластической деформации и способов очистки свариваемых поверхностей перед осадкой.

**Электрическая контактная сварка оплавлением** (1903 г.). Детали нагревают в специальной машине, пропуская через них электрический ток. В период нагрева детали сближают



так, чтобы образующиеся между ними перемычки металла расплавлились и на контактных поверхностях образовывался слой расплавленного металла. При осадке жидкий металл вытесняется вместе с окислами.

*Электропрессовая сварка* была предложена Научно-исследовательским институтом токов высокой частоты им. В. П. Волгодина (НИИ ТВЧ) в 1947 г. (рис. 10). Кромки труб нагревают током от индуктора, в который подается ток высокой частоты (ТВЧ). При прохождении по индуктору переменного тока на кромках индуцируется ток, вызывающий их нагрев до пластического состояния. После этого производится осадка с осевым усилием, равным 30—50 МПа.

*Прессовую сварку с нагревом токами радиочастоты* используют для получения непрерывного продольного шва на трубах в заводских и трассовых условиях (рис. 11). Непрерывная стальная лента поступает в сварочное устройство, где ее кромки сжимаются с помощью двух валков. На кромки устанавливаются контакты, которые при движении заготовки скользят по ее поверхности. К контактам подводят ток высокой частоты, который проходит от одной кромки к другой, через основание щели V-образной формы, а также от одного контакта к другому вокруг трубной заготовки. В каждый момент ток течет в обратном направлении и вследствие эффекта близости он концентрируется на свариваемых поверхностях. Концентрация тока на кромках достигается также вследствие поверхностного эффекта. На основе этих двух эффектов кромки трубной заготовки интенсивно нагреваются на незначительную глубину и при последующем обжатии свариваются.

Прессовая сварка с нагревом токами радиочастоты используется при производстве труб на трубных заводах, а также на передвижной трассовой установке «Уорм», которая была изготовлена в США в 1961 г.

*Дугопрессовая сварка* разработана Всесоюзным научно-исследовательским институтом электросварочного оборудования в 1957 г. При этом способе сварки трубы нагревают теплом электрической дуги, перемещающейся под действием магнитного поля в зазоре между кромками по периметру стыка (рис. 12). Свариваемые трубы и катушки электромагнитов в одном из способов располагают соосно. Катушки создают магнитные поля, направленные навстречу друг другу, обеспечивая в зазоре радиальную составляющую напряженности  $H_r$ . Дугу возбуждают в зазоре между кромками труб. Ток дуги

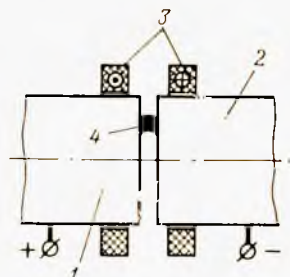


Рис. 12. ДУГОПРЕССОВАЯ СВАРКА:

1, 2 — нагреваемые трубы; 3 — катушки; 4 — электрическая дуга

по направлению совпадает с осью труб. Взаимодействие аксиального тока дуги  $I_a$  с радиальной составляющей напряженности магнитного поля  $H_r$  создает усилие  $P$ , действующее на дугу:  $P = kI_a H_r$ , где  $k$  — коэффициент, зависящий от целого ряда факторов, в том числе от зазора между трубами.

Усилие  $P$ , направленное по касательной, быстро вращает дугу по окружности стыка, обеспечивая равномерный нагрев кромок труб. По достижении сварочной температуры выполняется осевое сдавливание кромок (осадка).

Дугопрессовая сварка получила применение в строительстве для соединения труб малого диаметра (до 100 мм).

## ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СВАРОЧНОЙ ДУГИ

Под электрической сварочной дугой понимают устойчивый высокоамперный разряд с низким катодным напряжением (10—20 В) в газе высокого давления (около 100 кПа). Перечисленные свойства дуги требуют, чтобы источники питания имели небольшое напряжение (до 80 В). Для сварочной дуги характерно сосредоточенное выделение тепла, что обеспечивает высокую эффективность нагрева и плавления металла. Мощность дуги может колебаться в широких пределах от 50 Вт до 150 кВт и более.

Сварку электрической дугой можно выполнять на переменном или постоянном токе. В последнем случае при сварке можно использовать прямую полярность, когда электрод является катодом, а изделие — анодом, или обратную полярность, когда изделие — катод, а электрод — анод.

*Условие существования электрической дуги.* Электрический ток проходит через газы только в том случае, если эти газы находятся в ионизированном состоянии. В сварочной дуге ионизация газа в межэлектродном промежутке поддерживается непрерывно и самопроизвольно.

*Строение электрической дуги постоянного тока.* Дуговой разряд можно расчленить на три части — столб дуги, анодную и катодную области (рис. 13). Столб дуги представляет смесь электронов, положительных ионов и более или менее сильно возбужденных нейтральных атомов, что называется плазмой. Наиболее нагретыми участками на электродах являются анодные и катодные пятна.

*Физические процессы в электрической дуге.* В процессе горения дуги катодное пятно имитирует электроны. В прикатодной области электроны  $e$  движутся к столбу дуги, не испытывая столкновений с атомами газа  $A$ . В этом случае считают, что они разгоняются электрическим полем до энергии ионизации и при входе в столб ионизируют газ по схеме «ионизация электронным ударом»  $A + e = A^+ + 2e$  ( $A^+$  — положительно за-

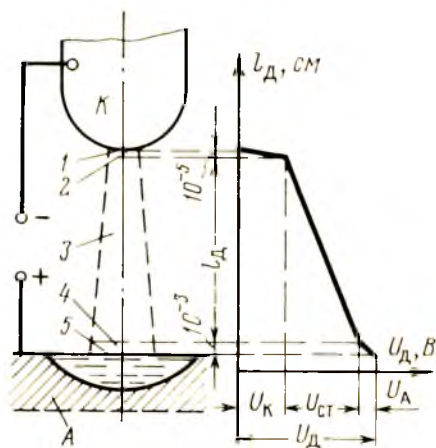
ряженный ион). В первом приближении протяженность прикатодной области можно принять равной длине свободного пробега электронов —  $10^{-5}$  см, а падение напряжения на этом участке будет соответствовать потенциалу ионизации наиболее легко ионизируемого газа.

Под действием катодного напряжения из столба дуги удаляются заряженные ионы, которые бомбардируют катод, нейтрализуясь при этом. Ионы отдают энергию ионизации и кинетическую энергию, которую они приобрели в результате разгона в прикатодной области. На основе этого процесса происходят нагрев и плавление катода. Эмиссия электронов способствует охлаждению катода, так как она проходит с поглощением энергии (так называемой работы выхода). Следовательно, в прикатодной области течет смешанный электронно-ионный ток.

В прианодной области протяженностью  $10^{-3}$  см течет электронный ток, на-

Рис. 13. СХЕМА ДУГОВОГО РАЗРЯДА:

А — анод; К — катод; 1 — катодное пятно; 2 — прикатодная область; 3 — столб дуги; 4 — прианодная область; 5 — анодное пятно



правленный из плазмы столба к аноду. Электроны бомбардируют анод, отдавая энергию выхода и кинетическую энергию, приобретенную в прианодной области. Этим процессом обусловлены нагрев и плавление анода.

В столбе дуги идет процесс образования частиц — ионизация и процесс потери частиц, вызванной, во-первых, их переходом в катод и анод и, во-вторых, рекомбинацией — образованием нейтральных частиц при столкновении разноименно заряженных.

Электрическое поле служит источником энергии, которая затрачивается на ионизацию. Энергия поля в большей степени воспринимается электронами, которые, будучи разогнанными до энергии ионизации, осуществляют ионизацию электронным ударом. Электроны с меньшей энергией при столкновении с атомами и ионами либо приводят их в возбужденное состояние, либо передают нейтральным частицам часть своей энергии упругим соударением, усиливая тепловое движение частиц. Благодаря последнему явлению в плазме дуги развивается термическая ионизация как результат соударения атомов, прежде всего возбужденных.

Рекombинация разноименно заряженных частиц и возбужденных атомов сопровождается выделением энергии в виде потока инфракрасного, видимого и ультрафиолетового излучения.

*Зажигание сварочной дуги* может осуществляться двумя способами. Первый способ предусматривает замыкание электрода о деталь и последующее разъединение. При этом соприкасающиеся контакты будут настолько сильно раскалены, что катод станет способным к электронной эмиссии при приложении напряжения в 60 В. Второй способ предусматривает зажигание дуги с помощью электрического пробоя воздушного промежутка, достигаемого приложением к электродам высокого напряжения в 2000—3000 В. Для этой цели используют специальный прибор — осциллятор, который обеспечивает переменное напряжение с частотой 50—150 кГц. Осциллятор используют чаще при сварке на переменном токе и подключают к дуге параллельно со сварочным трансформатором.

*Температурные условия в сварочной дуге.* Для мощных сварочных дуг характерно, что температура анодного и катодного пятен близка к температуре кипения металла (при плавящихся электродах) или к температуре плавления (при неплавящихся электродах). Температура плазмы дуги зависит от плотности тока и от содержания в ней элементов, обеспечивающих повышение или понижение проводимости плазмы. Введение в плазму элементов с низким потенциалом ионизации, например: кальция, натрия, калия — обеспечивает высокую проводимость плазмы при низких температурах и неизменной плотности тока. При том же токе введение элементов с большим сродством к электрону обеспечивает повышение температуры плазмы. Увеличение плотности тока в столбе дуги приводит к возрастанию температуры плазмы. Температура плазмы в сварочных дугах с плавящимися электродами достигает 6—8 тыс. °С. Для дуг с неплавящимся вольфрамовым катодом температура находится в пределах 10—15 тыс. °С. За счет обжигания холодными стенками сопла плазмотрона можно увеличить температуру плазмы до 25—30 тыс. °С.

*Тепловой баланс в дуге.* Электрическая энергия преобразуется в теплоту в трех областях: на поверхности анода, катода и в столбе дуги. Теплота, выделяющаяся в единицу времени на катоде, зависит от соотношения ионного и электронного тока, от потенциала ионизации газа плазмы, катодного напряжения и может составлять 10—15 % мощности дуги. Теплота, выделяющаяся в единицу времени на аноде, мало зависит от перечисленных факторов и составляет 35 % мощности дуги. В столбе дуги выделяется 15—55 % тепловой мощности. Теплота, выделяющаяся на катоде и аноде, практически полностью используется на нагрев и плавление металла. Теплота столба дуги частично используется на нагрев капель

электродного металла и металла ванны, а в основном — на нагрев окружающих столб защитного газа и шлака.

Количество расплавляемого электродного металла в единицу времени связано со сварочным током зависимостью

$$Q = \alpha_p I,$$

где  $\alpha_p$  — коэффициент расплавления электрода.

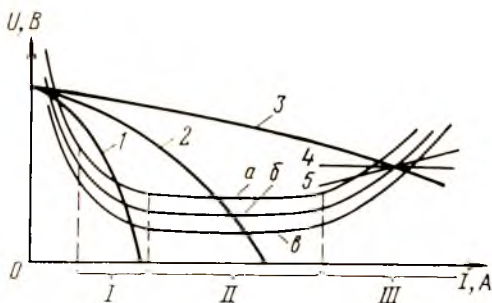
**Электрический баланс дуги.** Напряжение на сварочной дуге складывается из катодного падения напряжения  $U_k$ , анодного падения напряжения  $U_a$  и падения напряжения в столбе дуги  $U_{ст}$ . Величина  $U_{ст}$  прямо пропорциональна длине дуги  $l_d$ .

$$U_{ст} = E l_d,$$

где  $E$  — напряженность электрического поля в столбе.

Рис. 14. ОБОБЩЕННАЯ СХЕМА СТАТИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК СВАРОЧНЫХ ДУГ И ВНЕШНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ.

а, б, в — статические характеристики, соответствующие дугам с длинами  $l_{д1}$ ,  $l_{д2}$ ,  $l_{д3}$ ; 1, 2, 3 — падающие внешние характеристики источников питания; 4 — жесткая внешняя характеристика; 5 — возрастающая внешняя характеристика; I, II, III — области режимов сварки, предназначенные соответственно для ручной сварки, сварки под флюсом и сварки в среде защитных газов



Таким образом, напряжение дуги складывается из трех составляющих:

$$U_d = U_k + U_a E l_d.$$

Напряжение дуги зависит от состава электродов, покрытий, флюсов и защитных газов, диаметра электрода, силы тока и длины дуги.

Нелинейная зависимость напряжения от тока дуги при неизменной длине дуги и прочих параметрах называется статической вольт-амперной характеристикой дуги (рис. 14).

При ручной сварке покрытыми электродами статическая характеристика дуг ограничивается ниспадающей ветвью, при сварке под флюсом — преимущественно горизонтальной ветвью, при сварке в среде защитных газов, как правило, — возрастающей ветвью.

Для сварочных процессов устанавливается следующий диапазон напряжений и плотностей токов: ручная сварка 12—25 В, 5—25 А/мм<sup>2</sup>; сварка под флюсом 25—45 В, 40—125 А/мм<sup>2</sup>; сварка в среде защитных газов 25—35 В, 100—350 А/мм<sup>2</sup>.



Дуга, питаемая от источника переменного тока и напряжения, в каждый полупериод гаснет. Температура активных пятен и дугового промежутка при этом снижается. В плазме происходит деионизация газовой смеси и уменьшается электропроводность столба дуги. Поэтому в каждый последующий полупериод дуга возбуждается только при повышенном напряжении, называемом напряжением повторного зажигания дуги:  $U_3 > U_d$ .

*Устойчивость системы источник питания — дуга.* Устойчивость горения дуги и стабильность режима сварки зависит как от физических условий существования разряда, так и от свойств параметров источников питания и других элементов сварочной цепи. Важным свойством источника питания является его внешняя характеристика. Дуга будет гореть устойчиво в тех точках пересечения внешней характеристики источника питания со статической характеристикой дуги (см. рис. 14), где при случайном укорочении дуги ток и скорость расплавления электрода возрастают, а при увеличении длины — уменьшаются. В результате происходит процесс саморегулирования дуги и коэффициент устойчивости  $K_y$  записывается в виде

$$K_y = \frac{dU_d}{dI} - \frac{dU_n}{dI} > 0, \quad (1)$$

где  $dU_d/dI$  — тангенс угла наклона касательной к статической характеристике дуги в точке горения,  $dU_n/dI$  — тангенс угла наклона касательной к внешней характеристике источника питания в точке горения дуги.

Следовательно, если статическая характеристика дуги будет падающей  $dU_d/dI < 0$ , то для обеспечения условия устойчивости внешняя характеристика источника питания тоже должна быть падающей, причем в точке пересечения внешняя характеристика источника должна быть более крутопадающей, чем статическая характеристика дуги. При возрастающей статической характеристике дуги  $dU_d/dI > 0$ , как это имеет место при сварке дугой постоянного тока в среде защитных газов, допускается применение возрастающей внешней характеристики источника питания. Следовательно, условие (1) предопределяет выбор источника питания для различных способов дуговой сварки.



# ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ

### ОСОБЕННОСТИ РАБОТЫ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

Для обеспечения сварочного процесса в трассовых условиях пил на строительной площадке установки обычно комплектуют источником питания сварочной дуги (сварочным агрегатом с двигателем внутреннего сгорания, сварочным выпрямителем, сварочным электромашинным преобразователем), аппаратурой для осуществления процесса ручной или механизированной (автоматической или полуавтоматической) сварки.

Ручную сварку выполняют с подключением источника питания с помощью кабеля к свариваемому изделию и электрододержателю с закрепленным на нем электродом. Полуавтоматическую сварку проводят при механизированной подаче электрода в зону плавления, а перемещение проволоки вдоль стыка осуществляют вручную. При автоматической сварке используют механизированные процессы подачи проволоки в зону плавления и ее перемещение вдоль стыка с обеспечением устойчивого горения электрической дуги. Механизированная электродуговая сварка может выполняться голой проволокой, порошковой проволокой, под флюсом, в среде углекислого газа ( $\text{CO}_2$ ), в среде инертных газов ( $\text{Ar}$ ,  $\text{He}$ ,  $\text{N}_2$ ) или в смеси газов ( $\text{CO}_2 + \text{Ar}$ ) и т. п.

Автоматическая сварка может выполняться стационарными или передвижными сварочными установками. Стационарные установки широко применяются в заводских условиях при сварке полотнищ резервуаров большой вместимости, сварных балок, запорной арматуры и т. п. В трассовых условиях и на строительных площадках используют передвижные автоматические сварочные установки, которые позволяют легко перемещать их от стыка к стыку.

Конструктивное оформление, габариты, масса и стоимость полуавтоматов и автоматов во многом зависят от принципов, заложенных в основу работы сварочной головки или подающего механизма, которые должны обеспечить постоянство энергетических параметров процесса сварки: сварочного тока и напряжения на дуге. Эти параметры не должны выходить за пределы  $\pm 25$  А по току и  $\pm 2$  В по напряжению. Сварочный ток и напряжение могут значительно изменяться из-за колебаний длины дуги, которые вызываются целым рядом причин: проскальзыванием проволоки в подающем механизме, изменением скорости движения головки относительно свариваемого изделия и т. п. Сварочная головка должна реагировать на подобные изменения для обеспечения стабильного процесса

сварки, так как нарушение длины дуги приводит к изменению равенства между скоростью плавления и скоростью подачи проволоки. Равенство можно восстановить, изменяя скорость подачи проволоки или скорость ее плавления. Скорость подачи проволоки можно изменить автоматически действующим регулятором, а изменение скорости плавления проволоки при нарушении стабильности процесса происходит автоматически благодаря явлению саморегулирования дуги. Воздействовать на скорость плавления можно, изменяя тип внешней характеристики источника питания дуги.

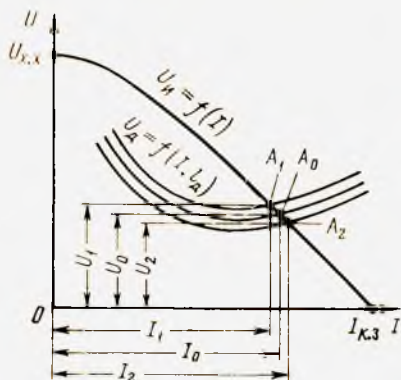


Рис. 15. ГРАФИК ИЗМЕНЕНИЯ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ КОЛЕБАНИИ ДЛИНЫ ДУГИ

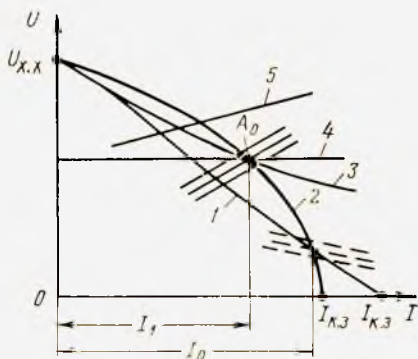


Рис. 16. ЗАВИСИМОСТЬ ФОРМЫ ВНЕШНЕЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСТОЧНИКА ОТ ИЗМЕНЕНИЯ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ ДУГИ

Сварочные головки применяют двух типов: с автоматическим изменением скорости подачи электродной проволоки и с постоянной скоростью подачи проволоки в зону плавления. Головки первого типа применяют в узком диапазоне токов ( $I = 400 \div 700$  А), они имеют довольно сложную систему автоматического регулирования скорости подачи проволоки. Поэтому для монтажных условий применяют головки второго типа.

Для возбуждения электрической дуги в воздухе или под флюсом требуется более высокое напряжение (равное или превышающее напряжение холостого хода источника  $U_{х.х}$ ), чем для устойчивого горения. Дуга возбуждается при напряжении  $U_d = 50 \div 80$  В, а устойчиво горит при  $U_d = 20 \div 40$  В. Процесс саморегулирования дуги можно рассмотреть на рис. 15. Если сварочный процесс идет при токе  $I_0$ , напряжении  $U_0$  и точка  $A_0$  соответствует устойчивому горению дуги, то этому режиму соответствует определенная скорость плавления  $v_0$ . При изменении длины дуги и неизменной внешней характеристике источника устойчивому горению дуги будет соответствовать

новая точка  $A_1$ . Как видно из рис. 15, переход процесса от точки  $A_0$  к точке  $A_1$  ( $I_1 > I_0$ ) приводит к уменьшению сварочного тока ( $I_1 < I_0$ ) и увеличению напряжения на дуге, что обеспечивает уменьшение скорости плавления электродной проволоки ( $v_1 < v_0$ ). Зависимость скорости плавления от тока и напряжения на дуге можно определить с достаточной точностью из уравнения  $v = K_1 I - K_2 U_d$ , где  $K_1$  — коэффициент саморегулирования дуги по току, см/(с·А);  $K_2$  — коэффициент саморегулирования дуги по напряжению, см/(с·В).

При сварке под флюсом, когда диаметр электрода не меняется и подается соответствующий сварочный ток, эти коэффициенты остаются почти постоянными. Уменьшение скорости плавления проволоки в данном случае приведет к восстановлению исходной длины дуги и заданных параметров сварочного процесса  $I_0$  и  $U_0$ . Если процесс переходит в точку  $A_2$  ( $I_2 < I_0$ ), то сварочный ток увеличивается, напряжение на дуге уменьшается ( $U_2 < U_0$ ), а скорость плавления электродной проволоки возрастает ( $v_2 > v_0$ ). Это приводит к восстановлению исходной длины дуги  $l_2$  и заданных сварочных параметров. Приведенный анализ показывает, что процесс саморегулирования дуги происходит тем интенсивнее, чем больше изменяется сварочный ток при отклонениях длины дуги на одну и ту же величину, что имеет место при более пологих внешних характеристиках источника питания сварочной дуги.

Зависимость наклона внешней характеристики от изменения тока и напряжения сварочной дуги можно установить на рис. 16. Для крутопадающей характеристики источника питания дуги 2 процессы саморегулирования проходят слабо, и только при пологих характеристиках 1 и 3 источника питания дуги они проходят интенсивно, так как изменения тока при колебаниях длины дуги значительны. Следовательно, характеристика 1 более пригодна для головки с принудительным регулированием скорости подачи, а характеристики 2 и 3 могут использоваться для сварки с постоянной скоростью подачи проволоки. При сварке в среде защитных газов ( $\text{CO}_2$ , Ar) система саморегулирования весьма надежна, так как в зону плавления подается тонкая электродная проволока, что позволяет применять автоматы и полуавтоматы с постоянной скоростью подачи проволоки. Электрическая дуга, горящая в среде защитных газов, при высокой плотности тока имеет возрастающую характеристику, поэтому процесс саморегулирования обеспечивается при жесткой внешней характеристике 4 источника, возрастающей характеристике 5 или очень пологопадающей характеристике 3.

Кроме указанных особенностей внешней характеристики, все источники питания сварочной дуги должны обладать определенными динамическими свойствами, что определяется отношением пикового значения тока короткого замыкания к его

установившемуся значению:  $K_d = I_{к.з.п} / I_{к.з.у}$ , где  $I_{к.з.п}$  — пиковый ток короткого замыкания;  $I_{к.з.у}$  — установившийся ток короткого замыкания.

К динамическим свойствам однопостовых сварочных генераторов предъявляют следующие требования: динамический коэффициент должен быть в пределах  $1 < K_d < 2,5$ ; время восстановления напряжения дуги не должно превышать 0,05 с; скорость нарастания тока должна быть 15—20 кА/с.

Источники питания дуги по современным стандартам характеризуются рядом параметров, получаемых при работе на установившихся режимах.

*Номинальный ток* соответствует расчетному значению сварочного тока и для выпускаемых источников питания находится в пределах 40—5000 А.

*Пределы регулирования сварочного тока* соответствуют минимальным и максимальным значениям тока, которые могут быть использованы при сварке. Отношение максимального тока к минимальному показывает кратность регулирования.

*Напряжение холостого хода* в значительной мере определяет нормальные условия зажигания и повторного возбуждения дуги. Для различных источников оно изменяется от 30 до 120 В.

*Условное рабочее напряжение* измеряется на зажимах источника под нагрузкой. Для источников питания дуги с номинальным сварочным током до 600 А оно определяется из уравнения  $U_d = 20 + 0,04 I_{св}$ .

Условное рабочее напряжение для более мощных источников питания принимают равным 44 В и выше.

*Продолжительность работы (ПР)* определяют по формуле

$$ПР = t_p / (t_p + t_n) = (t_p / t_n) 100.$$

Продолжительность цикла  $t_{ц}$  состоит из рабочего периода  $t_p$  и паузы  $t_n$  ( $t_{ц}$  принимают 5 или 10 мин). Для однопостовых источников питания дуги  $ПР = 60 \div 65 \%$ , для многопостовых — 100 %.

*Коэффициент полезного действия* характеризует потери энергии в самом источнике питания:  $\eta_{и} = (N_d / N_c) 100$ , где  $N_d$  — мощность дуги;  $N_c$  — мощность, потребляемая из сети. Величина  $\eta_{и}$  для различных источников питания дуги находится в пределах 45—98 %.

Источники питания сварочной дуги могут быть различными, однако их можно классифицировать, разбив на определенные группы по некоторым наиболее важным признакам:

по роду тока — постоянного и переменного;

по виду внешней характеристики — с крутопадающей, пологопадающей, жесткой и возрастающей внешней характеристикой или универсальные, которые позволяют получать внешние характеристики различного вида;

по роду привода — с приводным электродвигателем или двигателем внутреннего сгорания;

по характеру подачи тока на дугу — для сварки непрерывно горящей дуги и импульсной;

по числу одновременно питаемых постов — однопостовые и многопостовые.

Для обеспечения независимой работы одного поста от другого внешняя вольт-амперная характеристика многопостового источника должна быть жесткой.

Многопостовое питание обеспечивает низкий к. п. д. всей многопластовой системы

$$\eta_m = \eta_n \eta_{\text{и}} = U_d \eta_n / U_{\text{х. х.}},$$

где  $\eta_m$  — к. п. д. многопостового питания;  $\eta_n$  — к. п. д. одного поста;  $\eta_{\text{и}}$  — к. п. д. источника;  $U_d$  и  $U_{\text{х. х.}}$  — напряжения дуги и холостого хода источника.

## ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА

### Однопостовые генераторы

Для выполнения ручной, полуавтоматической и автоматической сварки стыков трубопроводов и резервуаров в качестве источника тока используют передвижные сварочные агрегаты, которые состоят из однопостового сварочного генератора постоянного тока и приводного двигателя (внутреннего сгорания), смонтированных на общей раме и соединенных эластичной муфтой. Кроме этого, на строительных площадках и сварочных базах вместо двигателя внутреннего сгорания используют электродвигатель, когда имеется достаточно мощная передвижная электростанция или силовая сеть переменного тока.

В зависимости от назначения однопостовые генераторы имеют различные внешние вольт-амперные характеристики: крутопадающие, крутопадающие в сочетании с пологопадающими, жесткие в сочетании с возрастающими и др.

Все генераторы имеют намагничивающие обмотки возбуждения  $\omega_n$ , которые питаются от независимого источника (рис. 17, а, б, в) или от самого генератора (рис. 17, г). В первом случае генераторы называют с независимым возбуждением, во втором — с самовозбуждением (нашли распространение в монтажных условиях). При протекании намагничивающего тока по обмотке  $\omega_n$  в генераторе наводится магнитный поток  $\Phi_n = I_n \omega_n / R_{\text{м. н.}}$ , где  $I_n$  — ток в намагничивающей обмотке;  $R_{\text{м. н.}}$  — магнитное сопротивление цепи на пути потока  $\Phi_n$ .

При холостом ходе  $U_{\text{х. х.}}$  поток определяет электродвигающую силу (э. д. с.) и напряжение на зажимах генератора

$$E_1 = C \Phi_n = C I_n \omega_n / R_{\text{м. н.}} = U_{\text{х. х.}}$$



Постоянная  $C$  определяется по формуле

$$C = \frac{pn}{60} \frac{N}{a} 10^{-8},$$

здесь  $p$  — число пар полюсов;  $n$  — частота вращения генератора;  $N$  — число активных проводников в якоре;  $a$  — число пар параллельных ветвей в обмотке якоря.

Изменением тока намагничивания осуществляют плавное регулирование напряжения холостого хода, а следовательно, и режим работы генератора при нагрузке. Большинство генераторов для дуговой сварки имеют обмотку возбуждения,

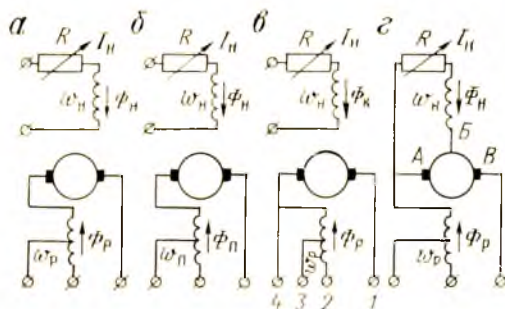


Рис. 17. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СХЕМЫ ОДНОПОСТОВЫХ ГЕНЕРАТОРОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

включенную последовательно с дугой и расположенную на отдельных башмаках. При нагрузке генератора возникает магнитный поток, наводимый намагничивающей силой последовательной обмотки возбуждения. В зависимости от способа включения последовательной обмотки возбуждения этот поток направлен встречно и согласно с намагничивающим потоком  $\Phi_n$ . Встречный или размагничивающий магнитный поток  $\Phi_p$  наводится размагничивающей обмоткой возбуждения  $\omega_p$  (рис. 17, а, в, г), согласный или подмагничивающий поток  $\Phi_n$  — подмагничивающей обмоткой возбуждения  $\omega_n$  (рис. 17, б).

При наличии в генераторе последовательной размагничивающей обмотки э. д. с. определяется из уравнения

$$E_r = C(\Phi_n - \Phi_p) = C(I_n \omega_n / R_{m, n} - I_r \omega_p / R_{m, p}),$$

где  $I_r$  — ток в якорной цепи генератора;  $R_{m, p}$  — сопротивление магнитной цепи на пути потока  $\Phi_p$ .

Принимая  $R_{m, n} \approx R_{m, p}$ , имеем

$$E_r = \frac{C}{R_m} (I_n \omega_n - I_r \omega_p).$$



При нагрузке напряжение на зажимах генератора

$$U_{\Gamma} = \frac{C}{R_{\text{м}}} (I_{\text{н}}\omega_{\text{н}} - I_{\Gamma}\omega_{\Gamma}) - I_{\Gamma}R_{\Gamma}. \quad (2)$$

Генераторы с размагничивающими последовательными обмотками имеют крутопадающие вольт-амперные характеристики. При отключении размагничивающей обмотки вольт-амперная характеристика генератора становится пологопадающей (при  $\omega_{\Gamma}=0$ ) и уравнение (2) имеет вид

$$U_{\Gamma} = \frac{C}{R_{\text{м}}} I_{\text{н}}\omega_{\text{н}} - I_{\Gamma}R_{\Gamma}.$$

Наличие секционирования в размагничивающей обмотке позволяет ступенчато регулировать сварочный ток, что дает возможность выполнять сварку на малых токах при повышенном напряжении холостого хода. При наличии в генераторе подмагничивающей последовательной обмотки возбуждения  $\omega_{\text{п}}$  (см. рис. 17, б) уравнение (2) имеет вид

$$U_{\Gamma} = \frac{C}{R_{\text{м}}} (I_{\text{н}}\omega_{\text{н}} + I_{\Gamma}\omega_{\text{п}}) - I_{\Gamma}R_{\Gamma}.$$

Изменяя число витков подмагничивающей обмотки, можно регулировать наклон вольт-амперной характеристики генератора. При минимальном числе витков  $\omega_{\text{п}}$  генератор имеет жесткую вольт-амперную характеристику и здесь выполняется равенство  $I_{\Gamma}\omega_{\text{п}} \approx I_{\Gamma}R_{\Gamma}$ . При большом числе витков  $I_{\Gamma}\omega_{\text{п}} > I_{\Gamma}R_{\Gamma}$ , что соответствует возрастающей внешней вольт-амперной характеристике генератора. Питание обмотки независимого возбуждения от отдельного источника усложняет конструкцию генератора, поэтому в промышленности получили большое распространение генераторы, у которых обмотка независимого возбуждения подключается к главной и дополнительной щеткам самого генератора. Подобные генераторы называют с самовозбуждением. Сварочные генераторы, выполненные в соответствии со схемами (рис. 17, а, в, г) с падающими вольт-амперными характеристиками входят в комплект агрегатов АДД-305, АДБ-307, установлены на самоходных сварочных установках УС-21, УС-41, а также их используют для преобразователей ПСО-300, ПСО-500, ПС-500.

В трассовых условиях применяют двухпостовой сварочный агрегат АДД-502-VI с вентильными генераторами для ручной и автоматической сварки под флюсом. Эти вентильные генераторы представляют собой индуктор повышенной частоты (500 Гц) с выпрямителем. Основные преимущества вентильных генераторов — отсутствие коллектора, силовых щеток, возможность дистанционного регулирования сварочного тока, получение более высокого к. п. д. (60—70 %), меньшая их масса. Для полуавтоматов и автоматов при сварке в среде защитных

газов ( $\text{CO}_2$  и Ar) используют преобразователь с жесткими и возрастающими характеристиками ПСГ-500-1. Генератор ГСГ-500-1 — четырехполюсный с расположением на главных полюсах двух обмоток с питанием от сети через стабилизатор и выпрямитель. Одна обмотка независимого возбуждения, другая последовательная, которая используется для подмагничивания и имеет две секции. При включении двух секций получается слегка возрастающая внешняя характеристика, а при одной секции обеспечивается жесткая характеристика с помощью реостата регулируется напряжение генератора. Сварочные генераторы этого типа используются только для сварки тонкой электродной проволокой, которая не допускает чрезмерного возрастания тока короткого замыкания. Для получения различных внешних характеристик у сварочных источников питания дуги существуют универсальные генераторы, где предусмотрено переключение последовательной обмотки со встречного включения на согласное. Это достигается изменением числа включенных витков и обеспечивает переход от падающей характеристики к жесткой для преобразователя ПСУ-500-1. Преобразователь ПСУ-300 с генератором ГСУ-300 используют одну обмотку возбуждения. Требуемая характеристика создается с помощью триода, подключаемого к цепи обмотки возбуждения.

### Многопостовые генераторы

Многопостовые агрегаты и преобразователи комплектуют генератором, который имеет две обмотки возбуждения: намагничивающую  $\omega_n$  и подмагничивающую  $\omega_p$  (рис. 18). Намагничивающую обмотку питают от основных щеток генератора. Напряжение на них мало зависит от нагрузки при наличии подмагничивающей обмотки возбуждения.

$$U_r = C (\Phi_n + \Phi_p) - I_r R_r$$

или

$$U_r = \frac{C}{R_m} (I_n \omega_n + I_p \omega_p) - I_r R_r.$$

Для обеспечения одновременной несинхронной работы нескольких постов внешняя характеристика сварочного генератора должна быть обязательно жесткой при соблюдении на всех режимах работы равенства

$$\frac{C I_r \omega_p}{R_m} \approx I_r R_r.$$

Сварочные посты подключают к генератору параллельно через регулируемые балластные реостаты. Одновременная ра-

бота нескольких постов от одного генератора позволяет повысить коэффициент использования оборудования. Для обеспечения падающей характеристики на каждом посту устанавливают балластный реостат, который также изменяет сварочный ток. Работа каждого поста может быть представлена следующими зависимостями:

при холостом ходе  $I=0$ ;  $U_{x.x}=U_r$ ;

в период рабочего режима  $I \neq 0$ ;  $U_n = U_r - IR_b$ ;

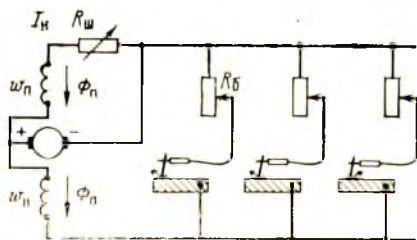
при коротком замыкании

$$U_n \approx 0; U_n = U_r - I_{к.з} R_b = 0;$$

$$I_{к.з} = U_r / R_b,$$

где  $I$  — сварочный ток;  $U_{x.x}$  — напряжение холостого хода;  $U_r$  — напряжение генератора;  $U_n$  — напряжение сварочного поста;  $R_b$  — омическое сопротивление балластного реостата;  $I_{к.з}$  — ток короткого замыкания.

Рис. 18. СХЕМА ПОДКЛЮЧЕНИЯ МНОГОПОСТОВОГО ГЕНЕРАТОРА ПОСТОЯННОГО ТОКА К СВАРОЧНЫМ ПОСТАМ



Сварочный генератор (рис. 18) имеет параллельную и последовательную обмотки возбуждения, которые создают магнитные потоки одного направления при согласном включении. С помощью подмагничивающей последовательности обмотки достигается компенсация падения напряжения на генераторе с увеличением нагрузки и обеспечивается его жесткая характеристика. Напряжение холостого хода генератора можно регулировать при помощи реостата  $R$ , который устанавливают в цепи параллельной обмотки возбуждения.

Число сварочных постов, подключаемых к генератору,  $n = I_r / I k_0$ , где  $I_r$  — номинальный ток генератора;  $I$  — средний ток сварочного поста;  $k_0$  — коэффициент одновременности работы постов, для установок с большим числом постов  $k_0 = 0.5 \div 0.6$ , а с малым числом постов  $k_0 = 0.7 \div 0.8$ .

На сварочных базах и строительных площадках применяют многопостовые преобразователи ПСМ-1000-II, ПСМ-1000-4, в которых электрический двигатель и генератор смонтированы в одном корпусе. Эти преобразователи часто используют как однопостовые источники питания, когда требуется большая плотность тока на электроде при автоматической сварке под флюсом.

## Сварочные выпрямители

Сварочные выпрямители собирают из полупроводниковых элементов — вентилях, которые используют для выпрямителя переменного тока. Выпрямители для сварочных работ имеют понижающий трансформатор с регулирующим устройством и блоки вентилях. Сварочные выпрямители подразделяют на однопостовые с крутопадающими, жесткими, пологопадающими и универсальными характеристиками и многопостовые с жесткими характеристиками. В сварочных выпрямителях применяют селеновые или кремневые вентилях, собранные по трехфазной мостовой или шестифазной схеме выпрямления (рис. 19), которые наиболее часто применяют в монтажных усло-

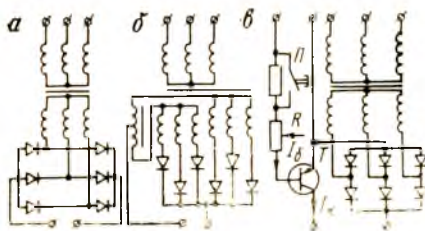


Рис. 19. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА СВАРОЧНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ:

*а* — трехфазная мостовая; *б* — шестифазная с уравнивающим дросселем; *в* — с транзисторным блоком

виях. В качестве понижающего трансформатора в сварочных выпрямителях используют часто трансформаторы с нормальным или повышенным рассеянием. Широкое распространение получили трансформаторы с подвижными катушками (ВД-301, ВД-302 и др.). Они просты по устройству, обладают достаточно высоким к. п. д. и имеют небольшую массу. В таких трансформаторах регулирование тока смешанное: с помощью переключения обмоток трансформатора и за счет изменения расстояния между первичными и вторичными обмотками.

Аналитическое выражение для рабочего участка внешней характеристики сварочного выпрямителя, собранного по трехфазной мостовой схеме:

$$U_d/U_{x.x} = \sqrt{\frac{3}{4} [1 - (I_d/I_{к.з})^2]},$$

где  $I_d$  — ток дуги в установившемся режиме.

Среднее значение напряжения холостого хода выпрямителя зависит от напряжения в трансформаторе:  $U_{x.x} = 3 \sqrt{3} \bar{U}_T / \pi$ , где  $\bar{U}_T$  — амплитудное вторичное напряжение трансформатора.

Ток короткого замыкания зависит от полного реактивного сопротивления одной фазы  $X_T$ , источника питания вентилях (трансформатора и дросселя)

$$I_{к.з} = U_{x.x} / \sqrt{3} X_T.$$

Динамические свойства трехфазных выпрямителей с падающей внешней характеристикой зависят от отношения рабочего напряжения дуги  $U_d$  к напряжению холостого хода  $U_{x.x}$ . Чем выше напряжение дуги перед коротким замыканием, тем больше отношение  $I_{к.з.п}/I_d$ . При уменьшении отношения  $U_d/U_{x.x}$  максимальное значение тока снижается, что способствует лучшему переносу расплавленного металла, и при  $U_d/U_{x.x}=0,4 \div 0,5$  процесс протекает удовлетворительно. Выпрямители с транзисторным блоком управления обладают высокой стабилизацией тока (рис. 19, в). Выпрямительный блок питается от трехфазного трансформатора с увеличенным магнитным расстоянием. В цепь выпрямленного тока последовательно дуге включают блок транзисторов  $T$ . Крутопадающую вольт-амперную характеристику формируют трансформаторы и транзисторные блоки. Изменяя ток базы  $I_b$ , можно в широких пределах изменять коллекторный ток  $I_k$  с помощью дополнительного выпрямителя и активного сопротивления  $R$ , установленного в цепи базы.

Сварочный ток дуги

$$I_d = I_k = \beta I_b + I_n,$$

где  $\beta$  — коэффициент усиления транзистора по току;  $I_n$  — неуправляемый ток трюда.

Пренебрегая величиной  $I_n$ , получаем  $I_d = \beta I_b$ . Из уравнения следует, что сварочный ток зависит только от тока управления  $I_b$ , что позволяет настраивать источник на требуемый режим сварки. Установка дополнительной обмотки связи по напряжению позволяет в таких источниках получать вольт-амперную характеристику с различным значением  $\partial U_n / \partial I$  в рабочей точке, где  $U_n$  — напряжение источника. Применение прерывателя  $\Pi$  позволяет вести процесс в импульсном режиме и добиваться плавного гашения дуги и др.

Универсальные сварочные выпрямители типа ВДУ имеют жесткие и крутопадающие вольт-амперные характеристики. Они имеют силовой трехфазный трансформатор и выпрямительный блок, собранный из тиристоров по шестифазной схеме с уравнительным реактором. Режим регулируется изменением угла открытия тиристоров выпрямительного блока. Скорость нарастания сварного тока в цепи регулируется дросселями с отпайками. Многопостовые сварочные выпрямители имеют силовой трансформатор с нормальным магнитным рассеянием и выпрямительный блок. Внешняя вольт-амперная характеристика этих выпрямителей жесткая. Ток на каждом посту регулируется при помощи балластных реостатов типа РБ у выпрямителей тока ВКСМ и ВДМ.

При сварке напряжение дуги  $U_d = U_0 - I_d R_c$ , где  $U_0$  — напряжение источника;  $R_c$  — сопротивление сварочной цепи,  $R_c = R_{пр} + R_b$ , здесь  $R_{пр}$  — сопротивление проводов;  $R_b$  — сопротивление балластного реостата.

Сварочный ток поста

$$I_{\text{п}} = I_{\text{д}} = (U_0 - U_{\text{д}})/R_0 \quad (R_{\text{пр}} \ll R_0).$$

При коротком замыкании  $I_{\text{к.з}} = U_0/R_0$ . Число постов  $n$ , которые могут быть подключены к многопостовому выпрямителю, определяют с учетом коэффициента одновременности  $k_0$ :  $n = I_{\text{г.н}}/k_0 I_{\text{п.с}}$ , где  $I_{\text{г.н}}$  — номинальный ток выпрямителя;  $I_{\text{п.с}}$  — средний ток поста;  $k_0 = 0,6$ .

В трассовых условиях и на монтажных площадках применяют однопостовые и многопостовые выпрямители следующих типов: ВД-301; ВД-302; ВД-303; ВД-306; ВДГ-302-УЗ; ВДУ-504-1-УЗ; ВДГ-601-УЗ; ВКСУ-500Х2; ВДГ-1001-УЗ; ВДУ-1001-УЗ; ВКСМ-1000-1; ВДМ-1601.

## ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

При сварке на переменном токе питание дуги осуществляют от однофазных и трехфазных установок. Применение установок трехфазного тока более выгодно, чем однофазных, так как силовая сеть загружается более равномерно, производительность сварки повышается на 20—40 % и экономия электроэнергии достигает 10—20 %. Трехфазная электрическая дуга горит более устойчиво и ее применяют для ручной и автоматической сварки металла больших толщин. Однако на строительных площадках трехфазные установки не применяют, так как при строительстве используют стальные листы малой и средней толщины.

### Однопостовые источники питания

Однопостовые источники питания переменного тока с падающей внешней характеристикой бывают реакторного и трансформаторного типов. В источниках питания реакторного типа (рис. 20, а) падающая характеристика обеспечивается с помощью включения в сварочную цепь индуктивного сопротивления дросселя (реактора), обычно встроенного в трансформатор. Эти источники питания имеют понижающий однофазный трансформатор, который понижает сетевое напряжение до напряжения холостого хода 60—70 В, что необходимо для безопасной работы. Дроссель, объединенный с трансформатором, создает падающую характеристику и регулирует сварочный ток. Источники питания этого типа выпускают в однокорпусном исполнении. На рис. 20, в изображена упрощенная векторная диаграмма, которая характеризует работу сварочного трансформатора.

Работа источника питания переменного тока может быть представлена следующими зависимостями: при холостом ходе  $I=0$ ;  $U_{\text{х.х}} \approx U_2$ ; при рабочем режиме  $I \neq 0$ ;  $\bar{U}_2 = \bar{U}_{\text{п}} + \bar{U}_{\text{др}}$ , где



$I$  — сварочный ток;  $U_{х.х}$  — напряжение холостого хода;  $U_2$  — напряжение вторичной обмотки трансформатора;  $U_n$  — напряжение сварочного поста;  $U_{др}$  — падение напряжения в дросселе.

Из диаграммы (рис. 20, в) можно установить, что падение напряжения в дросселе  $\bar{U}_{др} = \bar{I}\bar{R}_{др} + \bar{I}\bar{X}_{др}$ , где  $R_{др}$  — омическое сопротивление дросселя;  $X_{др} = 2\pi fL$  — индуктивное сопротивление дросселя;  $f$  — частота переменного тока;  $L$  — коэффициент самоиндуктивности дросселя, равный  $(0,4 \pi \omega_{др}^2 \cdot 10^{-8})/R_m$ ;  $\omega_{др}$  — число витков дросселя;  $R_m$  — магнитное сопротивление дросселя.

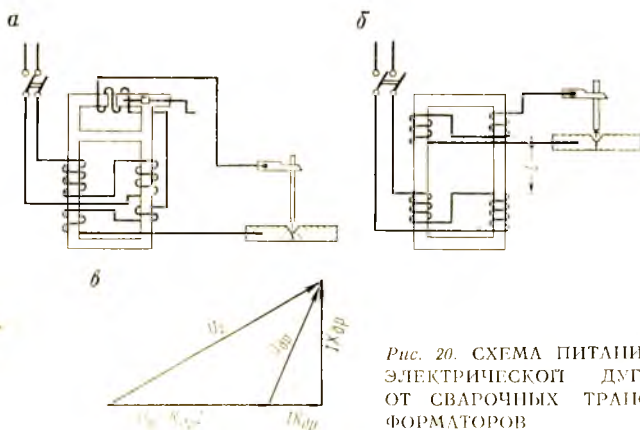


Рис. 20. СХЕМА ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ДУГИ ОТ СВАРОЧНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Если пренебречь величиной  $R_{др}$  как малой по сравнению с  $X_{др}$ , то следует, что, чем больше сварочный ток, тем больше индуктивное сопротивление дросселя и падение напряжения в дросселе, тем меньше напряжение на посту при постоянном напряжении во вторичной обмотке.

При коротком замыкании

$$U_n \approx 0; U_n = U_2 - U_{др} \approx 0;$$

$$U_2 - I_{кз} X_{др} \approx 0;$$

$$I_{кз} = \frac{U_2}{X_{др}} = \frac{U_2}{0,8 \pi^2 \cdot 10^{-8}} \cdot \frac{R_m}{\omega_{др}^2}. \quad (3)$$

Из уравнения (3) следует, что регулировать ток короткого замыкания, а также сварочный ток можно изменением индуктивного сопротивления. Если изменить число витков в дросселе, то регулирование тока получается ступенчатым, а при изменении зазора — плавным. Увеличение зазора приводит к уменьшению величин  $X_{др}$  и  $U_{др}$ , при этом сварочный ток возрастает. Этот способ регулирования тока из-за простоты и

плавности применяется чаще, особенно в источниках питания малой и средней мощности. Особенностью источников питания реакторного типа является постоянство напряжения холостого хода, что связано с постоянством напряжения во вторичной обмотке трансформатора. В трансформаторах второго типа падающая внешняя характеристика создается с помощью подвижных катушек первичной обмотки за счет искусственно развитого магнитного рассеяния между первичной и вторичной обмотками при изменении расстояния  $l$  (рис. 20, б). С увеличением расстояния между первичной и вторичной обмотками увеличиваются магнитные потоки рассеяния и индуктивное сопротивление обмоток возрастает. В данном случае каждому положению первичной обмотки соответствует отдельная внешняя характеристика, а главное, изменение расстояния обеспечивает плавное регулирование тока. Максимальное значение тока будет при минимальной величине  $l$ , и наоборот. Для трансформаторов этого типа характерно то, что напряжение холостого хода не остается постоянным с увеличением расстояния  $l$ , так как увеличение потоков рассеяния уменьшает магнитный поток в трансформаторе, что приводит к падению холостого хода на 1,5—2 В. Сварочные трансформаторы первого типа, применяемые на строительных площадках при сварке металлоконструкций, имеют ручной привод регулирования тока (типа СТН-500 и СТН-700) и с дистанционным кнопочным управлением (типа ТСД-500, ТСД-1000-3, ТСД-2000).

Трансформаторы с подвижной вторичной обмоткой применяют на монтажной площадке с номинальными токами 300 А (ТС-300, ТД-300, ТД-304) и 500 А (ТС-500, ТД-500).

Кроме перечисленных трансформаторов основных типов применяют облегченные малогабаритные трансформаторы типа ТСМ-240 и ТСП-1, рассчитанные для работы в монтажных условиях на максимальные токи 250 и 150 А соответственно. Режим в трансформаторе ТСМ-250 регулируют ступенчато путем включения дополнительных витков во вторичной обмотке. Плавную регулировку внутри каждой ступени выполняют намоткой от одного до пяти витков сварочного провода вокруг корпуса трансформатора.

Минимальный ток в трансформаторе типа ТСП-1 обеспечивают при работе только той частью вторичной обмотки, которая расположена на втором стержне, отдельно от первичной обмотки. По мере отключения витков вторичной обмотки, размещенной на втором стержне, и увеличения числа подключаемых витков вторичной обмотки на первом стержне магнитная связь между первичной и вторичной обмотками повышается, магнитное расстояние и индуктивное сопротивление уменьшается, что приводит к возрастанию сварочного тока.

Работа сварочных трансформаторов происходит с определенными перерывами, что связано с заменой электрода при

сварке, очистке и т. д., поэтому для них применимо понятие продолжительности включения (ПВ). Величина ПВ, определяющая длительность непрерывной работы трансформатора, вычисляется по формуле

$$ПВ = t_{св}/(t_{св} + t_{п}),$$

где  $t_{св}$  — время протекания сварочного тока;  $t_{п}$  — время паузы между двумя включениями; номинальная величина ПВ для сварных трансформаторов обычно равна 60—65 %.

### ЭНЕРГОПИТАНИЕ СВАРОЧНЫХ ПОСТОВ

Сварку магистральных трубопроводов и резервуаров плавлением выполняют тремя способами: ручным электродуговым, в среде углекислого газа, под слоем флюса. Энергопитание сварочных постов может осуществляться различными энергетическими системами: от самоходных и прицепных дизель-генераторов; самоходных и прицепных дизель-генераторов в сочетании с выпрямителями и преобразователями; от линий электропередач с использованием выпрямителей, преобразователей, трансформаторов и т. п.

Для ручной сварки неповоротных стыков труб в полевых условиях применяют самоходные многопостовые установки. Сварочные установки различают по числу размещенных на них генераторов и в зависимости от типа трактора: четырехпостовая установка на тракторе Т-130Г-2—УС41 (рис. 21); двухпостовая установка на тракторе Т-100МГ—УС21. В задней части базового трактора установлена площадка, на которой находится редуктор—ускоритель со сварочными генераторами ГД-310 (максимальный ток 230 А) и генератором переменного тока для питания вспомогательного оборудования (ручные электрошлифовальные машинки, электрозубила, электродрели, освещение и др.). На площадке также размещены шкаф сварочных генераторов и шкаф генератора собственных нужд для подключения вспомогательного оборудования. Для освещения рабочей зоны на крыше установлены два прожектора. К передней части рамы трактора прикреплен кронштейн, установлены стрела с гидроподъемником и печь для сушки электродов. На стреле укреплены сварочные кабели и палатка. Палатка изолирует места сварщиков от атмосферных осадков и имеет освещение, вентилятор для отсоса газов, образующихся в процессе сварки, остекленные окна и вентиляционные шторы.

Для четырехпостовой установки АЭП-100-150К применяют колесный трактор Т-150К. От вала отбора мощности трактора приводится во вращение генератор переменного тока, от которого осуществляется энергоснабжение блока питания, установленного на прицепе КУНГ-1М, где размещен сварочный выпрямитель ВКСМ-1000 с четырьмя балластными реостатами

1208182

РБ-301. Для сушки электродов предусмотрена печь типа СНОЛ-Зс, а зачистка стыков осуществляется двумя электрошлифовальными машинками.

В трассовых условиях используют трактор К-701, который применяют для восьмипостовой установки АС81, а на тракторе ДТ-75-С2 размещают двухпостовую установку УСТ-21.

Самоходные многопостовые установки широко применяют при строительстве трубопроводов в труднопроходимых местностях, при монтаже компрессорных станций, переходов и захлестов.

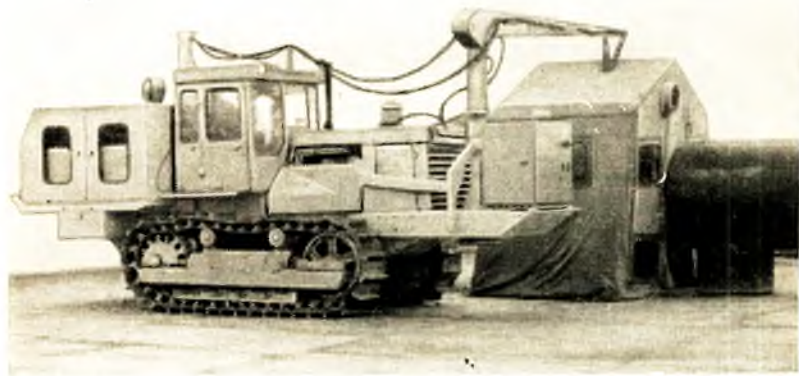


Рис. 21. ЧЕТЫРЕХПОСТОВАЯ УНИФИЦИРОВАННАЯ СВАРОЧНАЯ УСТАНОВКА

В качестве источников питания для ручной сварки на монтажных площадках, кроме перечисленных ранее, применяют передвижные сварочные агрегаты АДД-501, АДД-502, АДД-305, которые имеют дизельные двигатели и генераторы с падающими вольт-амперными характеристиками. Для сварки в среде углекислого газа применяют установку СДАУ-1, которая имеет преобразователь ПСГ-500. Электродвигатель преобразователя питают от электростанции ДЭС-40М-1 или ДЭС-50.

Сварочные агрегаты применяют также при выполнении автоматической сварки под флюсом на трубосварочных базах. В этом случае для ручной сварки первого слоя шва и подварки изнутри корня шва применяют сварочный агрегат АДД-502, который используют и для сварки под флюсом.

При питании полустационарной трубосварочной базы от передвижной электростанции или от линии электропередачи в качестве источников питания дуги применяют сварочные выпрямители или преобразователи. Для ручной сварки на трубосварочных базах используют выпрямители ВД-301, ВД-302 или преобразователи ПСО-300; автоматическую сварку на базе вы-

полняют при питании дуги от выпрямителей ВКСМ-1000 и ВДМ-1601 с набором балластных реостатов или ВД-1001-УЗ с тиристорным управлением, а также от преобразователя ПСМ-1000-1 с балластными реостатами или от двух преобразователей ПСО-500, включенных параллельно.

На трассе и при строительстве резервуаров наиболее рационально применять единые энергоустановки, когда в качестве источника электроэнергии используют передвижную дизель-электрическую станцию или линию электропередач.

В схеме единой энергоустановки с использованием дизель-электрической станции на трубосварочной базе может быть применена одна из электростанций (табл. 1).

*Таблица 1*

ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ ДЛЯ СВАРОЧНЫХ ПОСТОВ

| Марка электростанции | Двигатель                 |                          | Генератор                 |               |
|----------------------|---------------------------|--------------------------|---------------------------|---------------|
|                      | Номинальная мощность, кВт | Частота вращения, об/мин | Номинальная мощность, кВт | Напряжение, В |
| АД-50М               | 73                        | 1500                     | 50                        | 230, 400      |
| АД-75М               | 110                       | 1500                     | 75                        | 230, 400      |
| СКЛ-80               | 94                        | 750                      | 80                        | 390           |
| ДЭС-100              | 110                       | 1500                     | 100                       | 400           |
| ДГ-100-ТСП           | 110                       | 1500                     | 100                       | 400           |
| «Шкода»              | 137,6                     | 750                      | 120                       | 400           |
| ЭДС-200-30Т/400М     | 240                       | 1500                     | 200                       | 400           |
| «Вола» ЗПП-250/С     | —                         | 1500                     | 200                       | 230, 400      |

Электростанции для трубосварочных баз чаще устанавливают в вагончиках с отоплением, что позволяет значительно сократить время на подготовку и запуск двигателя в зимнее время. Применение дизель-электрической станции позволяет использовать сварочные преобразователи и выпрямители различных назначений.

### *Глава 3*

## **ФИЗИКО-МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ СВАРКЕ ПЛАВЛЕНИЕМ**

Существующие виды сварки в основном предусматривают местный концентрированный нагрев определенных участков изделия до температуры расплавления или до пластического состояния. Процессы нагрева и охлаждения изделия при сварке оказывают решающее влияние на качество сварных соединений, так как тепловое состояние металла, шлака и других взаимодействующих компонентов при этом в значительной мере



воздействует на направленность всех физико-химических и металлургических процессов. В зависимости от распределения тепла при сварке, скорости отвода тепла и охлаждения сварочной зоны определяется структура наплавленного металла и зоны термического влияния. От цикла нагрева и охлаждения конструкции при сварке, а также от характера температурных полей главным образом зависят значение и вид возникающих напряжений и деформаций.

С тепловыми процессами связаны важнейшие сварочные характеристики, относящиеся к скорости нагрева металла, скорости расплавления, производительности сварки и ее технико-экономической эффективности.

На основе теории распространения тепла, а также исследований разработаны методы инженерных расчетов тепловых процессов, обеспечивающих применение рациональных сварочных режимов и технологии сварки металлов.

### СПОСОБЫ ПЕРЕДАЧИ ТЕПЛА

При сварке, как правило, возникает неравномерное распределение температуры, но длительный нагрев изделия способствует достижению *установившегося теплового состояния*, при котором температура изменяется от точки к точке, но в каждой отдельной точке остается неизменной в течение времени передачи тепла. Процесс передачи тепла от более нагретых участков тела к менее нагретым называется *теплопроводностью*. В твердых телах теплопроводность является единственным способом передачи тепла, в то время как в жидкостях и газах преобладает конвективный и лучистый теплообмен.

Нагретому телу соответствует определенная температура в каждой точке, и совокупность значений температуры в данный момент во всех точках рассматриваемого тела представляет *температурное поле*. Температурное поле характеризуют изотермами или изотермическими поверхностями, которые представляют собой геометрическое место точек с одинаковой температурой.

Если в температурном поле будет происходить перемещение по направлению  $SS$ , то выражение скорости изменения температуры на пути  $\Delta S$  примет вид  $(T_1 - T_2)/\Delta S$ ; в пределе, полагая  $\Delta S \rightarrow 0$ , получим выражение *градиента температуры по данному направлению*

$$\frac{\partial T}{\partial S} = \lim_{\Delta S \rightarrow 0} \frac{T_1 - T_2}{\Delta S},$$

где  $T_1 - T_2$  — разность температур рассматриваемых изотерм.

Градиент температуры в данной точке есть вектор, совпадающий с направлением наибольшего изменения температуры,



поэтому градиент по касательной равен нулю, а по нормали к изотермической поверхности принимает наибольшее значение

$$\text{grad } T = \partial T / \partial n,$$

где  $\partial T / \partial n$  — градиент температуры по нормали.

*Закон теплопроводности Фурье* определяет удельный тепловой поток через изотермическую поверхность в данной точке:  $q_T = -\lambda \text{ grad } T$ , где  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности.

На основе закона Фурье выведено общее дифференциальное уравнение теплопроводности

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \left( \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right).$$

Это уравнение описывает процесс распространения тепла при постоянных коэффициенте теплопроводности  $\lambda$  и объемной теплоемкости  $c\rho$ , в действительности они зависят от температуры довольно сильно и учет этого фактора приводит к нелинейным дифференциальным уравнениям.

Дифференциальное выражение

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$$

называют оператором Лапласа и для упрощения его записывают в виде

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = \nabla^2 T.$$

Тогда

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{\lambda}{c\rho} \nabla^2 T \text{ или } \frac{\partial T}{\partial t} = a \nabla^2 T.$$

Скорость выравнивания температуры характеризуют *коэффициентом температуропроводности*

$$a = \lambda / c\rho.$$

### Расчетные схемы нагреваемого тела и источников тепла

Процессы распространения тепла при сварке являются сложными, и для решения конкретных задач переходят к более простым идеальным теоретическим схемам, которые в достаточной степени отражают реальную картину распространения тепла при сварке. Формы и размеры тела существенно влияют на характер распространения тепла в нем, так как близость границ тела к источнику тепла резко искажает тепловое поле,

поэтому для расчетов выбирают одну из следующих схем нагрева тела:

*бесконечное тело* имеет значительную протяженность по осям  $x$ ,  $y$ ,  $z$ , границы его не влияют на характер теплового поля;

*полубесконечное тело* имеет одну ограничивающую плоскость  $z=0$ , со стороны которой действует источник тепла; остальные граничные поверхности удалены на достаточное расстояние от источника тепла и наличие их не сказывается на распределении тепла по изделию; такую схему используют при наплавке валика на поверхность массивного тела;

*плоский слой* имеет две параллельные плоскости  $z=0$  и  $z=\delta$ , которые расположены близко от источника тепла, что приводит к искажению теплового поля; этой схеме соответствует лист средней толщины большой протяженности и ширины;

*пластина* соответствует плоскому слою с небольшой толщиной  $\delta$ , неограниченно простирающейся в направлениях  $ox$  и  $oy$ ; этой схеме соответствует тонкий лист, температура в котором при сварке со сквозным проплавлением равномерно распределена по толщине;

*стержень* соответствует телу с поперечным сечением  $F$ , в котором предполагается, что температура полностью выравнена по сечению.

Кроме идеальных схем нагреваемых тел при расчете сварочных тепловых процессов имеется схематизация источников, которая классифицируется по следующим признакам: по распределению ввода тепла — точечный источник, линейный, плоский и объемный; по длительности действия — мгновенные и постоянно действующие; по расположению относительно исследуемой точки — неподвижные, подвижные и быстро движущиеся.

Точечный источник тепла соответствует источнику с бесконечно малыми размерами и в пределе представляет точку. Тепло, вводимое электрической дугой, можно считать точечным источником, так как геометрически оно расположено в центре пятна нагрева.

Линейный источник тепла имеет равномерно распределенное тепло вдоль прямой и сконцентрировано оно в тонкой длинной призме с сечением бесконечно малой величины.

Плоский источник тепла соответствует равномерному и одновременному распределению тепла на некоторой плоскости.

Объемный источник тепла соответствует равномерно выделяемому теплу по всему объему, например при нагреве электрода протекающим током в процессе дуговой сварки.

Метод источников удобен для решения задач применительно к нагреву и охлаждению металла при сварке, когда область распространения тепла не ограничена, а источник сосредоточен в весьма малом объеме.

## МЕТОДЫ РАСЧЕТА РАСПРОСТРАНЕНИЯ ТЕПЛА ОТ МГНОВЕННЫХ СОСРЕДОТОЧЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ

Непрерывно действующие источники тепла можно представить как совокупность мгновенных источников, определенным образом распределенных по поверхности или по объему тела.

Процесс распространения тепла в бесконечно малом объеме неограниченного теплопроводящего тела от *мгновенного точечного* источника выражается уравнением

$$T(R, t) = \frac{Q}{c\rho (4\pi at)^{3/2}} e^{-\frac{R^2}{4at}},$$

где  $Q$  — количество теплоты;  $T$  — температура исследуемой точки тела;  $t$  — время от момента внесения тепла;  $R = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$  — расстояние от источников тепла до точки тела с координатами  $x, y, z$ ;  $a$  — коэффициент температуропроводности;  $c$  — удельная теплоемкость тела;  $\rho$  — плотность тела;  $e$  — основание натуральных логарифмов.

Для *мгновенного линейного источника*, вводящего тепло в пластину  $\delta$  через неограниченную по длине призму с бесконечно малым основанием в неограниченном теплопроводящем теле, решение дифференциального уравнения теплопроводности примет вид

$$T(r, t) = \frac{Q_1}{c\rho 4\pi at} e^{-\frac{r^2}{4at}},$$

где  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$  — расстояние рассматриваемой точки от источника тепла;  $Q_1$  — тепло, вводимое через призму.

Если в бесконечный стержень *мгновенным плоским источником* введено тепло, то оно распределяется только по оси  $xx$  при отсутствии отвода тепла через боковые поверхности в окружающую среду. Решение уравнения имеет вид

$$T(x, t) = \frac{Q_2}{c\rho \sqrt{4\pi at}} e^{-\frac{x^2}{4at}}, \quad (4)$$

где  $x$  — расстояние исследуемой точки от плоскости источников тепла;  $Q_2$  — тепло, приложенное к плоскости  $xoz$ .

В приведенных формулах были рассмотрены только три случая действия мгновенных сосредоточенных источников. В действительности источники действуют непрерывно и имеют распространение в большем или меньшем объеме.

Для решения задач распространения тепла от реальных источников используют *принцип наложения элементарных решений*, который заключается в том, что температура от совмест-

ного действия совокупности распределенных в пространстве или времени источников принимается равной сумме температур от действия каждого отдельного источника. Принцип наложения применяется при расчете процесса распространения тепла линейными дифференциальными уравнениями и подобными граничными условиями.

### НАГРЕВ МЕТАЛЛА СВАРОЧНОЙ ДУГОЙ

Тепло, выделяемое электрической дугой вследствие высокой теплопроводности металла, интенсивно отводится в холодную массу металла, повышая его температуру. При сварке не все тепло, выделяемое дугой, используется на нагрев изделия, так как часть его расходуется на нагревание атмосферы и окружающих предметов путем конвекции и радиации. Поэтому *эффективная тепловая мощность дуги*  $q$  всегда меньше полной тепловой мощности  $q_1$  и выражается формулой  $q = \eta_{\text{н}} UI$ , где  $q$  — эффективная тепловая мощность дуги;  $\eta_{\text{н}} = q/q_1$  — эффективный к. п. д. процесса нагрева изделий дугой (при автоматической сварке под слоем флюса  $\eta_{\text{н}} = 0,8 \div 0,9$ , при сварке плавящимся электродом открытой дугой  $\eta_{\text{н}} = 0,7 \div 0,75$ , при сварке в среде  $\text{CO}_2$   $\eta_{\text{н}} = 0,6 \div 0,7$ , при аргоно-дуговой сварке неплавящимся электродом  $\eta_{\text{н}} = 0,5 \div 0,55$ );  $U$  — напряжение дуги;  $I$  — ток дуги.

Эффективный к. п. д. процесса нагрева изделия дугой зависит от технологии сварки, длины дуги, степени углубления ее в металл и др.

Точность тепловых расчетов для сварочных процессов зависит от правильности выбора идеализированной схемы. В большинстве случаев электрическую дугу считают точечным или линейным источником. При наложении валика на толстую пластину сварочную дугу принимают как точечный источник на поверхности тела. Если сваривают листы за один проход с полным проплавлением, то сварочную дугу рассматривают как линейный источник. Сварочная дуга является непрерывно действующим источником, но при наложении прихваток, когда требуется определить температуру тела через промежуток времени, во много раз превышающие период горения, можно считать источник тепла мгновенным.

Схему подвижного источника часто принимают при расчете температур для ручной дуговой сварки, а для автоматической сварки принимают схему быстродвижущегося источника тепла. При выборе расчетных схем следует учитывать принцип местного влияния, который показывает, что температурное поле зависит от размеров и характера распределения источника тепла только на расстояниях одного порядка с его размерами; на больших расстояниях температурное поле практически не зависит от формы источника и занимаемого им объема.

## РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТЕПЛА ПРИ ОДНОПРОХОДНОЙ СВАРКЕ ПЛАСТИН ВСТЫК

При сварке пластин встык за один проход с полным проплавлением можно считать, что температуры равномерно распределены и одинаковы по толщине. Электрическая дуга в этом случае является линейным распределенным по толщине источником тепла и температура не будет зависеть от координаты  $z$ , а определится значениями  $x$ ,  $y$  и временем  $t$ .

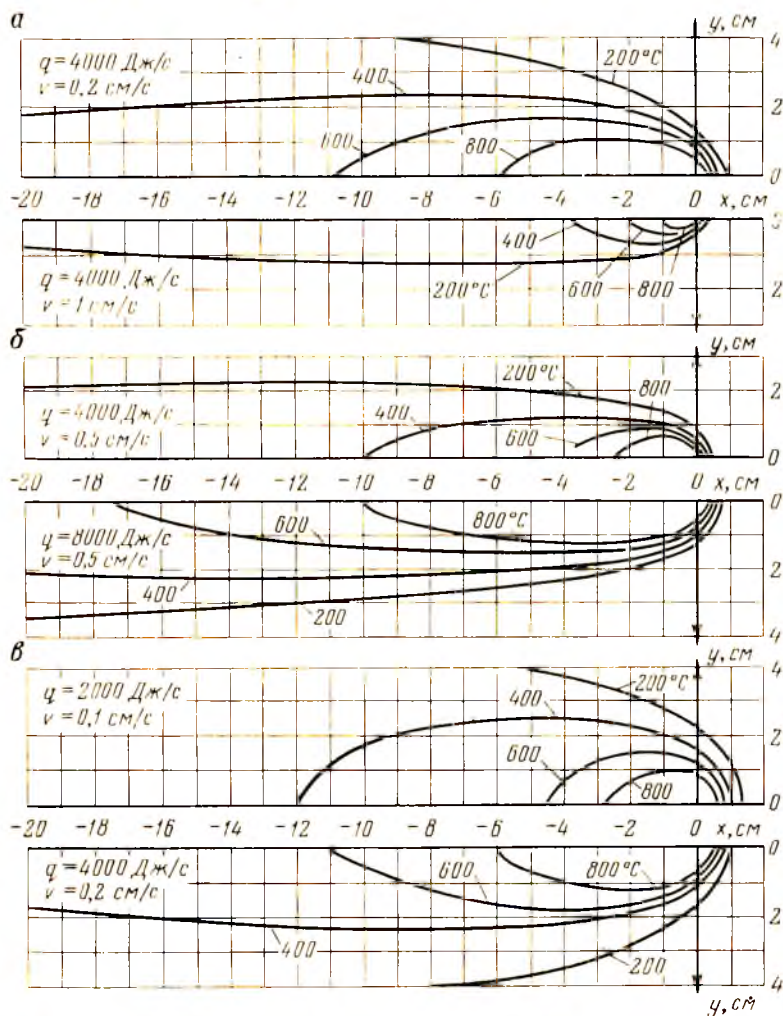


Рис. 22. ГРАФИКИ ВЛИЯНИЯ РЕЖИМА СВАРКИ НА ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ ПРЕДЕЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ В ПЛАСТИНЕ ТОЛЩИНОЙ 1 СМ:

**a** — влияние скорости перемещения при постоянной мощности; **б** — влияние мощности дуги при постоянной скорости; **в** — влияние мощности и скорости при постоянной тепловой энергии



Для предельного установившегося теплового состояния температурное поле постоянно, не зависит от времени и определяется формулой для нагрева пластины длительно действующим подвижным линейным источником тепла

$$T(r, x) = \frac{q}{2\pi\lambda\delta} e^{-\frac{vx}{2a}} K_0\left(r \sqrt{\frac{v^2}{4a^2} + \frac{b}{a}}\right), \quad (5)$$

где  $r$  — плоский радиус-вектор элемента подвижного поля, т. е. расстояние от центра источника тепла до исследуемой точки;  $v$  — скорость сварки;  $K_0(u)$  — Бесселева функция от мнимого аргумента второго рода нулевого порядка, эта функция табулирована;  $b = 2\alpha/c\rho\delta$  — коэффициент теплоотдачи;  $\alpha$  — коэффициент поверхностной теплоотдачи;  $\delta$  — толщина пластины;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности.

Параметры режима сварочной дуги, как показывают исследования уравнения (5), существенно сказываются на характере температурного поля предельного состояния. Так, увеличение скорости сварки при постоянной мощности источника ( $q = \text{const}$ ) способствует сужению изотерм в направлении, перпендикулярном к перемещению дуги и сгущаются впереди нее (рис. 22, а). Увеличение мощности дуги (при  $v = \text{const}$ ) способствует увеличению площади, занимаемой изотермами по ширине и длине (рис. 22, б). При постоянной погонной энергии ( $q/v = \text{const}$ ) увеличение мощности дуги приводит к увеличению площадей, ограниченных изотермическими кривыми, а рост скорости сварки уменьшает эти площади (рис. 22, в).

Сварка изделий с различными теплофизическими свойствами на одном режиме показывает, что характер тепловых полей неодинаков. Наибольшее влияние на тепловое поле оказывает теплопроводность. Сравнение площадей, очерченных изотермой 400 °С для хромникелевой стали, малоуглеродистой стали, алюминия и меди, показывает, что с увеличением теплопроводности эти площади уменьшаются и увеличиваются области, нагретые до более низких температур.

#### **РАСПРОСТРАНЕНИЕ ТЕПЛА ПРИ СВАРКЕ МОЩНЫМИ БЫСТРОДВИЖУЩИМИСЯ ИСТОЧНИКАМИ**

Увеличение скорости автоматической сварки и мощности сварочных источников тепла приводит к увеличению областей, нагретых до определенной температуры. При этом длина зоны нагрева увеличивается пропорционально скорости, а ширина возрастает, стремясь к определенному пределу. Изотермы, сдвигаясь в области, уже пройденной источниками, приобретают более вытянутый характер и приближаются к прямым, параллельным оси  $x$ . Градиент температур в направлении осей  $z$  и  $y$  намного больше, что позволяет пренебречь распространением теплоты в направлении  $x$ , так как градиент  $\partial T/\partial x \rightarrow 0$ .



Рассмотрим случай нагрева линейным источником, когда мощность источника и скорость сварки бесконечно возрастают ( $q \rightarrow \infty$ ,  $v \rightarrow \infty$ ), а их отношение остается постоянным ( $q/v = \text{const}$ ).

Пусть при автоматической сварке по оси  $x$  движется источник тепла, проплавляющий пластину полностью и прогревающий ее равномерно по толщине (рис. 23). Тепло от источника распространяется главным образом в плоскости, перпендикулярной к шву, и можно считать, что теплообмен между элемен-

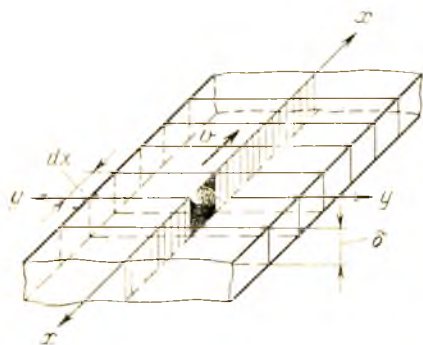


Рис. 23. РАСЧЕТНАЯ СХЕМА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕПЛА ПРИ НАГРЕВЕ ПЛАСТИНЫ ЛИНЕЙНЫМ БЫСТРОДВИЖУЩИМСЯ ПОСТОЯННО ДЕЙСТВУЮЩИМ ИСТОЧНИКОМ

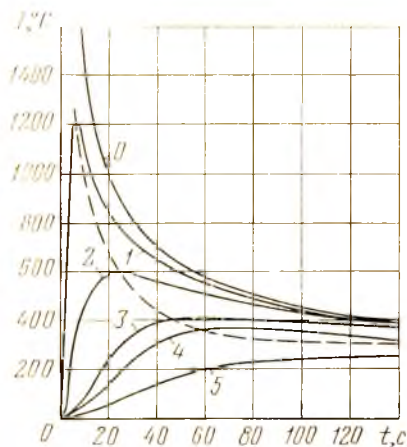


Рис. 24. КРИВЫЕ ТЕРМИЧЕСКИХ ЦИКЛОВ ТОЧЕК, УДАЛЕННЫХ ОТ ОСИ ШВА:

0, 1, 2, 3, 4, 5 соответствуют точкам, удаленным от оси шва на 0, 1, 2, 3, 4, 5 см; пунктирная линия — кривая максимальных температур

тарными брусками отсутствует. Тепло, подведенное к ним при сварке, распространяется как в стержне сечением  $\delta dx$ . Количество тепла, полученное сечением за время  $dt$  при прохождении пути  $dx$ , будет равно  $dQ = qdt$ . Время  $dt$  бесконечно мало, поэтому можно считать, что тепло  $dQ$  внесено в сечение  $\delta dx$  мгновенно. Интенсивность мгновенного плоского источника

$$Q_2 = \frac{dQ}{\delta dx} = \frac{qdt}{\delta dx} = \frac{q}{v\delta}.$$

Подставляя полученное выражение в уравнение (4) для распространения тепла в стержне от мгновенного плоского источника, получаем

$$T(y, t) = \frac{q}{v\delta c\rho \sqrt{4\pi at}} e^{-\frac{y^2}{4at}}. \quad (6)$$

С учетом теплоотдачи с боковой поверхности пластины окончательное решение имеет вид

$$T(y, t) = \frac{q}{\text{вср} \sqrt{4\pi a t}} e^{\frac{y^2}{4at} - bt}, \quad (7)$$

где  $t$  — время, отсчитываемое от момента, когда источник пересекает плоскость, перпендикулярную к оси  $x$ , в которой находится рассматриваемая точка.

### Расчет термического цикла нагреваемого изделия

Действие неподвижных источников тепла при нагреве приводит к повышению температуры  $y$  тела. Она может достигнуть максимального значения и остаться постоянной, сколько бы долго ни продолжал действовать источник. Для подвижного источника тепла температурное поле связано с источником и перемещается по изделию. В предельном состоянии скорость перемещения температурного поля соответствует скорости перемещения источника тепла. По мере приближения источника к рассматриваемой точке температура тела начинает повышаться, достигая максимума, и при дальнейшем перемещении температурного поля начинает понижаться.

Изменение температуры во времени данной точки тела называется *термическим циклом*. Для каждой точки тела при термическом цикле характерна своя *максимальная температура*  $T_{\max}$  и время ее достижения  $t_{\max}$ , отсчитываемое от момента пересечения источником сечения тела, в котором находится рассматриваемая точка (рис. 24). Определение максимальной температуры нагрева позволяет установить протяженность зоны возможной повышенной твердости при сварке закаливающих сталей и принять меры к ее уменьшению и т. д.

Для определения максимальных температур в процессе распространения тепла при автоматической сварке пластин встык используем уравнение (7). Такая температура наступает в момент времени, когда  $\partial T(y, t)/\partial t = 0$ .

Прологарифмируем уравнение (7) и определим производную по  $t$ :

$$\ln T(y, t) = \ln \frac{q}{\text{вср} \sqrt{4\pi a}} - \frac{1}{2} \ln t - \frac{y^2}{4at} - bt;$$

$$\frac{d \ln T(y, t)}{dt} = -\frac{1}{2t} - \frac{y^2}{4at^2} - b = 0.$$

Последнее равенство соответствует  $t_{\max}$ , при котором достигается  $T_{\max}$ . Умножим все члены равенства на  $t_{\max}$

$$\frac{y^2}{4at_{\max}} = \frac{1}{2} + bt_{\max}.$$

Так как  $b$  мало по сравнению с  $1/2$ , то членом  $bt_{\max}$  можно пренебречь, тогда  $t_{\max} = y^2/2a$ . Подставляя в уравнение (7) значение  $t = t_{\max}$ , получаем

$$T_{\max}(y) = \frac{q}{v\delta c\rho \cdot 2y\sqrt{\pi/2}} e^{-\frac{1}{2} - \frac{by^2}{2a}}.$$

Вычислив  $\sqrt{2/\pi}e = 0,484$ , будем иметь

$$T_{\max}(y) = \frac{0,484q}{v\delta c\rho \cdot 2y} \left(1 - \frac{by^2}{2a}\right). \quad (8)$$

Аналогично определяют максимальную температуру и время для процесса распространения быстродвижущегося точечного источника тепла по поверхности полубесконечного тела:

$$T_{\max} = \frac{0,368q}{\pi/2v\delta c\rho r_x^2}; \quad t_{\max} = \frac{r_x^2}{4a},$$

где  $r_x^2 = y^2 + z^2$  — квадрат радиуса-вектора, т. е. расстояние от оси  $x$  до исследуемой точки.

#### НАГРЕВ И ПЛАВЛЕНИЕ ЭЛЕКТРОДНОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ДУГОВОЙ СВАРКЕ

Электроды и сварочная проволока при сварке плавлением нагреваются в основном за счет использования тепла в результате сопротивления электрода протекающему току и тепловой электрической дуги на участке 5—10 мм от нагреваемого торца. Нагрев электрода током в интервале температур от 0 до 800 °С определяется из рассмотрения следующих зависимостей:

$$\begin{aligned} \frac{D_1 + T}{T_{\text{пр}} - T} &= \frac{D_1 + T_0}{T_{\text{пр}} - T_0} e^{nt}; \\ T_{\text{пр}} &= md_1 j^2 + T_0; \\ n &= \frac{A}{md_1} \left( \frac{T_{\text{пр}}}{D_1} + 1 \right), \end{aligned}$$

где  $D_1$ ,  $m$ ,  $A$  — опытные величины:

|                    | $A, \frac{\text{мм}^2 \cdot \text{С}}{\text{А}^2 \cdot \text{с}}$ | $D_1, ^\circ\text{С}$ | $m, \text{мм}^2 \cdot \text{С}/\text{А}^2$ |
|--------------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------|--------------------------------------------|
| Постоянный ток . . | 0,024                                                             | 200                   | 2,5                                        |
| Переменный ток . . | 0,027                                                             | 240                   | 2,5                                        |

$T$  — температура электрода при нагреве;  $T_{\text{пр}}$  — предельная температура, наступающая при бесконечно длительном прохождении тока по электроду;  $T_0$  — начальная температура электрода;  $t$  — время прохождения тока по электроду;  $j$  — плотность тока;  $d_1$  — диаметр электродного стержня.

При автоматической сварке, когда плотность тока в электродной проволоке достигает  $40\text{--}50 \text{ А/мм}^2$  и нагрев непродолжителен, можно пренебречь теплоотдачей через боковую поверхность, полагая предельную температуру  $T_{\text{пр}} \rightarrow \infty$ .

Уравнение нагрева вылета проволоки (участок проволоки от токопроводящего контакта до дуги) будет иметь вид

$$T(t) = D_1(e^{nt} - 1); \quad n = Aj^2/D_1.$$

Распределение температуры  $T(x)$  вблизи торца электрода и сварочной проволоки, нагреваемых дугой, можно описать уравнением нагрева стержня подвижным плоским источником

$$T_x - T_{\text{т}} = (T_{\text{к}} - T_{\text{т}}) e^{-\omega x/a},$$

где  $T_{\text{т}}$  — температура нагрева электрода током;  $T_{\text{к}}$  — средняя температура капель в дуге;  $x$  — расстояние от торца электрода, где температура принимается равной  $T_{\text{к}}$ , до рассматриваемой точки;  $\omega$  — скорость плавления электрода.

### Нагрев и проплавление свариваемого металла

Горение электрической дуги приводит к образованию жидкой сварочной ванны. Размеры сварочной ванны зависят от ряда технологических параметров режима и физико-химических свойств свариваемого металла. Длину ванны расплавленного металла можно определить из уравнения, описывающего температурное поле при наплавке валика на массивное тело мощной быстродвижущейся дугой:

$$T(r, t) = \frac{q}{2\pi\lambda tv} e^{-r^2/4at};$$

$$r^2 = y^2 + z^2.$$

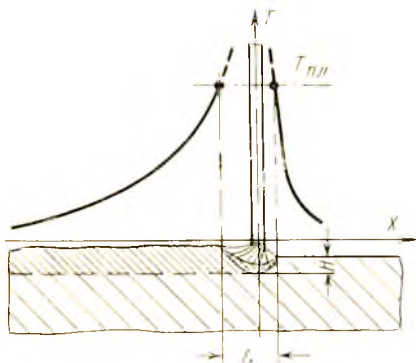


Рис. 25. СХЕМА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ В СВАРНОМ СОЕДИНЕНИИ

Наибольший интерес представляет максимальная длина ванны на поверхности изделия (рис. 25), когда  $r=0$  и уравнение

$$T(0, t) = q/(2\pi\lambda tv).$$

Найдем время пребывания каждого элемента в жидком состоянии, которое соответствует  $t_{\text{в}}$  — времени прохождения дугой длины  $L$ , при этом  $T = T_{\text{пл}}$ , тогда

$$T_{\text{пл}} = q/(2\pi\lambda vt_{\text{в}}),$$

откуда  $t_{\text{в}} = q/(2\pi\lambda v T_{\text{пл}})$ . Обозначив  $P_1 = 1/2\pi\lambda T_{\text{пл}}$ , будем иметь  $t_{\text{в}} = P_1 q/v$ .

Время пребывания каждого элемента, лежащего на оси шва, в жидком состоянии пропорционально погонной энергии.

Определим длину ванны  $L$ , зная  $t_n$  и скорость сварки  $v$ :

$$L = vt_n = qv/2\pi\lambda T_{пл}v = IU\eta_n/2\pi\lambda T_{пл}.$$

Положив  $\eta_n/(2\pi\lambda T_{пл}) = P_2$ , получим  $L = P_2IU$ .

Следовательно, длина сварочной ванны при наплавке валика на массивное тело пропорциональна мощности дуги. Подобная зависимость сохраняется и для наплавки валиков на стальные листы. Параметры сварочной ванны — ее длина  $L$ , ширина  $B$  и глубина  $H$ .

### ТЕПЛОВАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ И ТЕРМИЧЕСКИЙ К. П. Д. ПРОЦЕССА ПРОПЛАВЛЕНИЯ

В сварочном процессе при наплавке валика и выполнении шва участвуют основной и электрический металлы. Площади наплавки  $F_n$  и проплавления  $F_{пр}$  (рис. 26) характеризуют степень участия этих металлов при сварке. Расплавление основного металла можно характеризовать следующими показателями:  $H/B$  — относительной глубиной проплавления;  $F_{пр}/HB$  — коэффициентом полноты;  $F_{пр}/F_n$  — коэффициентом площадей. Для проплавления основного металла расходуется часть тепла электрической дуги, которую можно охарактеризовать тепловой мощностью  $q_{пр} = F_{пр}vS_{плр}$ , где  $q_{пр}$  — тепловая мощность проплавления;  $F_{пр}$  — площадь проплавления основного металла;  $v$  — скорость сварки;  $S_{пл}$  — теплосодержание расплавленного металла сварочной ванны.

Тепловая эффективность процесса проплавления выражается полным тепловым к. п. д.

$$\eta_{пр} = q_{пр}/q_1 = F_{пр}vS_{пл}/IU.$$

На нагрев изделия используется часть тепла дуги, а остальное тепло теряется в окружающую среду. В то же время для нагрева и расплавления основного металла расходуется часть эффективной мощности дуги, а остальное тепло теряется на перегрев ванны жидкого металла выше температуры плавления и на подогрев окружающей массы металла. Подобные затраты неизбежны при сосредоточенных источниках тепла и теплопроводности металла. Поэтому эффективность процесса проплавления оценивается термическим к. п. д.:  $\eta_t = q_{пр}/q$ . Следовательно, полный тепловой к. п. д. равен произведению эффективного и термического к. п. д.:

$$\eta_{пр} = (q_{пр}/q)(q_{пр}/q_1); \quad \eta_{пр} = \eta_n\eta_t.$$

Термический к. п. д. процесса проплавления зависит от многих факторов: от мощности источника тепла, скорости сварки, степени углубления дуги, размеров изделия. Термический к. п. д.



наплавки или сварки можно определить из расчетов. Так, при однопроводной сварке пластины встык мощной быстродвижущейся дугой  $\eta_t$  можно определить, используя выражение (8). Приняв, что теплоотдача с поверхности отсутствует, т. е.  $b=0$ , получим

$$T_{\max}(y) = \sqrt{2/\pi e} (q/v_{\text{ср}} \delta \cdot 2y). \quad (9)$$

Подставляя в уравнение (9) выражение  $B=2y$  (рис. 27) и  $T_{\max}(y) = T_{\text{пл}}$ , будем иметь,

$$q_{\text{пр}} = v \delta B_{\text{ср}} T_{\text{пл}} = q \sqrt{2/\pi e};$$

$$\eta_t = \frac{q_{\text{пр}}}{q} \frac{v \delta B_{\text{ср}} T_{\text{пл}}}{q} = \sqrt{2/\pi e} = 0,484.$$

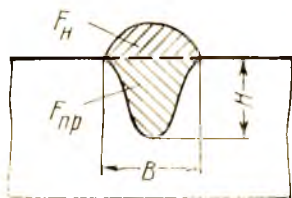


Рис. 26. ГЕОМЕТРИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ СВАРНОГО ШВА

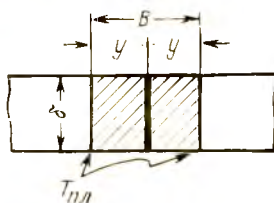


Рис. 27. РАСЧЕТНАЯ СХЕМА К ВЫВОДУ ТЕРМИЧЕСКОГО К. П. Д. ПРОЦЕССА ПРОПЛАВЛЕНИЯ

Для определения  $\eta_t$  при сварке тонких листов электрической дугой, перемещающейся с произвольной скоростью, можно воспользоваться номограммой в трудах Н. Н. Рыкалина.

## РЕГУЛИРОВАНИЕ СТРУКТУРНЫХ ИЗМЕНЕНИЙ ПРИ СВАРКЕ

Тепло, выделяемое сварочной дугой, распространяется в металле, создавая в зоне термического влияния и наплавленном металле повышение температуры до максимума, а затем ее снижение. Тепловое воздействие сварочного процесса на основной металл характеризуется *термическим циклом*. Основной металл в зоне термического влияния подвергается своеобразной обработке, при которой структура металла изменяется в соответствии с термическим циклом нагрева и охлаждения. Термические циклы различных зон, удаленных от границы сплавления, неодинаковы, поэтому сварное соединение имеет ряд слоев с неоднородной структурой и механическими свойствами. Для оценки действия параметров режима сварки и регулирования процессов изменения структуры в основном металле сварного соединения необходимо:

определить зависимость термического цикла в зоне термического влияния от сварочного режима, геометрии изделия, температуры подогрева и внешних условий, в которых протекает сварка;

определить влияние выбранного термического цикла на структуру и механические свойства сварного соединения.

Наличие стали разнообразных марок в трубопроводном и резервуарном строительстве, где каждая сталь по-своему воспринимает тепловое воздействие сварочного процесса, требует в каждом отдельном случае выбора определенного режима

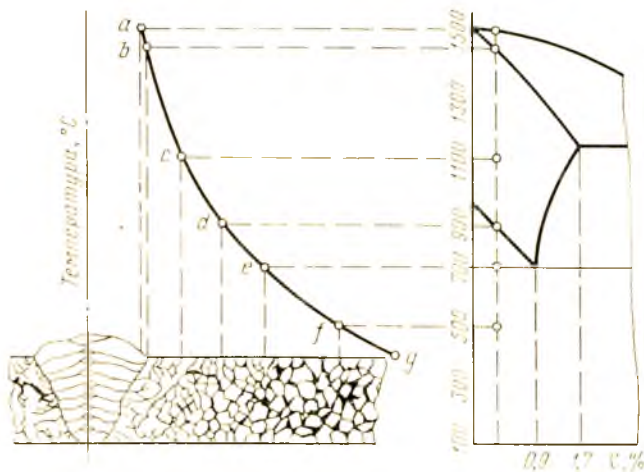


Рис. 28. СХЕМА СТРОЕНИЯ ЗОНЫ ТЕРМИЧЕСКОГО ВЛИЯНИЯ

сварки, при котором сварное соединение обеспечит высокие эксплуатационные свойства с изменением структуры в зоне термического влияния.

Распределение температур по поверхности сварного соединения и ее влияние на структуру основного металла показано на рис. 28. Рассматривая диаграмму железо — углерод при определенных температурных условиях, можно определить в сварном соединении границы отдельных структурных участков зоны термического влияния.

*Участок неполного расплавления* (при сварке линия сплавления *ab*) включает зону основного металла, нагретую до температуры плавления, и при максимальном нагреве имеет твердую и жидкую фазы. При сварке малоуглеродистой стали этот участок слабо различим, в средне- и высокоуглеродистых сталях он выражен более резко. Микроструктура этой зоны в значительной мере определяет прочностные свойства соединения.

*Участок перегрева* (зона *bc*) имеет нагрев в точке *c* до температуры выше точки  $A_{c3}$  на 100—200 °C, что способствует

росту зерна. Металл этой зоны имеет крупнозернистую структуру. В сталях с повышенным содержанием углерода в этом месте шва наблюдается грубая игольчатость феррита — видманштеттова структура. Перегретый металл обладает пониженными механическими свойствами.

*Участок нормализации (зона cd)* имеет мелкозернистую структуру, что объясняется перекристаллизацией металла при нагреве выше критической температуры  $A_{c3}$ . Механические свойства металла в этой зоне не ниже свойств основного металла.

*Участок неполной перекристаллизации (зона de)* включает металл, нагретый при сварке в интервале от точки  $A_{c1}$  до  $A_{c3}$ , где происходит частичная перекристаллизация металла.

*Участок рекристаллизации (зона ef)* наблюдается при сварке сталей, подвергавшихся предварительному наклепу или пластической деформации. При нагреве из раздробленных деформацией обломков зерен начинают вырастать более крупные. Температура начала рекристаллизации соответствует примерно  $450^\circ\text{C}$ . Процесс рекристаллизации зависит от температуры нагрева, длительности выдержки и степени деформации и может привести к снижению пластических свойств металла.

*Участок синеломкости (зона fg)* включает металл, где нагрев осуществляется до температуры  $300^\circ\text{C}$  и структура не отличается от структуры основного металла.

Теория распространения тепла позволяет рассчитывать скорость охлаждения сварного соединения, длительность нагрева в зависимости от режима сварки.

## ОСНОВНЫЕ ЗАКОНОМЕРНОСТИ РАЗВИТИЯ МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Физико-химические процессы, протекающие в зоне плавления, удобно рассматривать на основе законов химической термодинамики. Для металлургических процессов при сварке характерно, что:

в каждом отдельном объеме зоны плавления (гомогенном или гетерогенном) реакции стремятся к состоянию равновесия, как наиболее выгодному с энергетической точки зрения;

переход из неравновесного состояния, характеризующегося свободной энергией  $G_1$ , в равновесное с энергией  $G_2$  сопровождается уменьшением свободной энергии системы взаимодействующих веществ ( $\Delta G = G_2 - G_1 < 0$ );

величина  $\Delta G$ , определенная для реакции соединения веществ (например, для металла с кислородом), характеризует тенденцию к соединению или так называемое химическое сродство.

Химическое сродство тем больше, чем быстрее убывает свободная энергия системы взаимодействующих веществ при пере-

ходе от некоторого наперед заданного состояния в равновесное.

Величину  $\Delta G$  изобарного потенциала (как и изохорного) при температуре  $T$  вычисляют из уравнения

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S, \quad (10)$$

где  $\Delta H$  — алгебраическая сумма теплосодержаний продуктов реакции, взятых с плюсом, и исходных веществ, взятых с минусом;  $\Delta S$  — алгебраическая сумма энтропий, полученная по тому

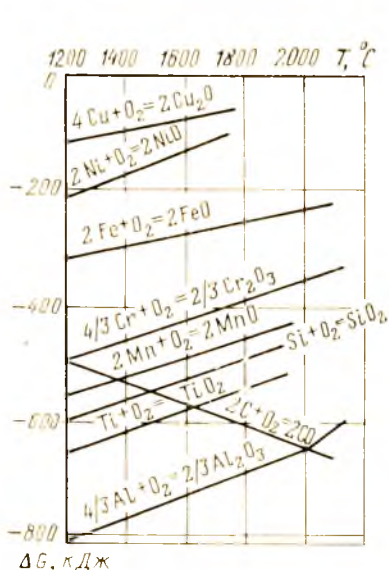


Рис. 29. ЗАВИСИМОСТЬ СВОБОДНОЙ ЭНЕРГИИ ОБРАЗОВАНИЯ ОКСИДОВ ОТ ТЕМПЕРАТУРЫ

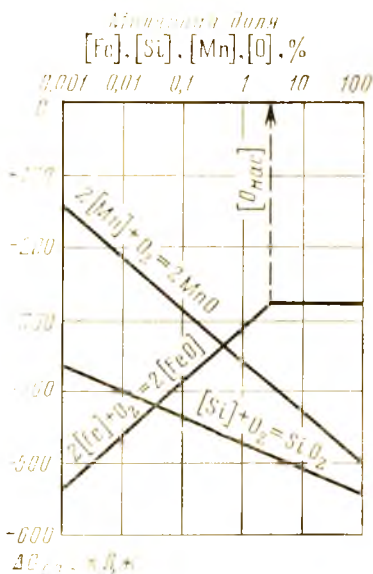


Рис. 30. ИЗМЕНЕНИЕ СРОДСТВА К КИСЛОРОДУ ЖЕЛЕЗА, КРЕМНИЯ И МАРГАНЦА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ИХ КОНЦЕНТРАЦИИ В СТАЛИ ПРИ ТЕМПЕРАТУРЕ 1500 °C

же принципу. Величины  $\Delta H$  и  $\Delta S$  вычисляют с использованием термодинамических констант равновесия веществ — участников реакции.

Результаты расчета по формуле уменьшения свободной энергии системы для различных свободных (чистых) оксидов (10), представляющих интерес для металлургических процессов при сварке для температур 1500—2300 К, показаны на рис. 29. Каждый элемент, сродство которого к кислороду больше (на рис. 29 каждая вышележащая линия), способен отнимать кислород от оксидов элементов с меньшим сродством, являясь по отношению к оксидам таких элементов восстановителем. С повышением температуры сродство к кислороду у всех

элементов, за исключением углерода, уменьшается. Углерод, благодаря особым свойствам, может стать при повышении температуры активнее всех остальных элементов, что используется для регулирования некоторых важных процессов при сварке сталей. Для окислов и элементов, находящихся в одной ванне, сродство к кислороду зависит от концентрации этих элементов  $[N_x]$  и кислорода  $[O]$  в растворе.

В данном случае приращение свободной энергии для реакций окисления, проходящих между кислородом и элементами, растворенными в малоуглеродистой или низколегированной стали, определяют по формулам:

для железа — основы сплава

$$\Delta G_{\text{сп}} = \Delta G + RT \ln \left( \frac{[O]}{[O_{\text{нас}}]} \right)^m, \quad (11)$$

где  $[O_{\text{нас}}]$  — концентрация кислорода в насыщенном растворе; для легирующих элементов

$$\Delta G_{\text{сп}} = \Delta G + RT \ln \frac{1}{[N_x]^n}.$$

Показатели степени  $m$  и  $n$  являются стехиометрическими коэффициентами реакции окисления любого элемента



Результаты расчета изменения сродства железа, кремния и марганца к кислороду в стали по уравнениям (11) и (12) изображены на рис. 30. Из рисунка видно, что сродство к кислороду у легирующих элементов в растворе меньше, чем у свободных элементов. Сродство к кислороду основы сплава — железа зависит от концентрации в сплаве кислорода  $[O]$ , и оно увеличивается, достигая предельного значения при  $[O_{\text{нас}}]$ .

При использовании уравнений (11) и (12) получают громоздкие выражения, которые не всегда обеспечивают высокую точность расчета. Поэтому на практике применяют упрощенные методы расчета.

Тенденция к изменению состава расплавленного металла в результате его физико-химического взаимодействия с окружающей средой тем значительнее, чем дальше от равновесия находилась первоначально системы взаимодействующих веществ (чем меньше  $\Delta G$ ). Указанная тенденция реализуется тем лучше, чем больше скорость реакции, т. е. чем выше температура. Изменение химического состава наплавленного металла зависит также от относительной поверхности контакта со средой (отношение поверхности жидкой металлической фазы к ее объему  $\nu$ ), относительных масс шлака и газа (отношение масс шлака и газа к массе жидкого металла  $\psi$ ) и от длительности контакта взаимодействующих фаз  $\tau$ .



Металлургические процессы при сварке протекают коротковременно с большим градиентом температур, со значительным перемешиванием взаимодействующих фаз. Взаимодействие между шлаком, газом и металлом происходит на стадии капли и ванны. На стадии капли имеет место небольшая отдаленность системы от состояния равновесия, так как температура металла при сварке стальными электродами соответствует 2000—2300 °С и максимальная относительная поверхность контакта металла с газом и шлаком составляет  $10^{-2}$ — $10^{-3}$  м<sup>2</sup>/кг. За короткий период (0,01—0,8 с) на стадии капли интенсивно происходит и практически полностью завершается легирование металла из покрытий электродов и из флюсов. В этот период имеются значительные потери легирующих элементов от окисления кислородом газовой фазы и от испарения.

На стадии ванны характерны сравнительно невысокая температура металла (1700—1800 °С) и на порядок меньше относительная поверхность контакта фаз. На этой стадии время контакта металла с газом и шлаком достигает 5—50 с, но перечисленные процессы почти не получают полного развития. На стадии капли параметры  $T$ ,  $v$ ,  $\psi$ ,  $\tau$  в большей мере зависят от параметров режима сварки. Изменение режима сварки вызывает значительные изменения химического состава наплавленного металла при сварке в среде защитных газов и под слоем флюса. Меньшее воздействие на ванну оказывается при сварке стержневыми толстопокрытыми электродами, где изменение режима не влияет на относительную массу шлака, которая предопределена толщиной покрытия. Изменение параметров дуговой сварки (увеличение напряжения, уменьшение диаметра электрода, переход с прямой полярности на обратную, уменьшение силы тока) способствует усилению процессов на стадии капли, приводя к возрастающей потере металла от окисления при сварке в среде  $\text{CO}_2$ . Применение для защиты легирующих флюсов в данном случае ведет к увеличению перехода легирующих элементов из флюса в металл.

### **МЕТАЛЛУРГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ ПРИ СВАРКЕ ПЛАВЛЕНИЕМ**

При сварке плавлением наплавленный металл является продуктом взаимодействия металла стержня электрода и металла шва с газами, покрытиями, флюсами и образующимися при плавлении покрытий и флюсов шлаками.

Шлаки состоят из различных оксидов и солей, которые имеют пониженную, по сравнению с жидким металлом, плотность и поэтому располагаются в основном на поверхности металлической ванны. В процессе сварки толстопокрытыми электродами, порошковой проволокой и с применением керамических флюсов шлаки образуются в результате плавления



покрытий, флюсов. Сварочные шлаки выполняют следующие основные функции:

защиту жидкого металла от непосредственного контакта с воздухом;

проведение в той или иной степени процессов раскисления, легирования и рафинирования металла;

улучшение теплового режима сварки за счет снижения скорости охлаждения металла;

поддержание устойчивости процесса сварки;

обеспечение правильного формирования металла шва.

Химические свойства шлака в большей мере определяются *степенью кислотности* или обратной ей величиной — *степенью основности шлака*. За степень кислотности  $n$  принимают отношение сумм молекулярных процентов кислых  $M_K$  и основных  $M_O$  оксидов данного шлака:  $n = \Sigma M_K / \Sigma M_O$ .

Сварочные шлаки имеют кислые оксиды —  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ ,  $\text{B}_2\text{O}_3$  и *основные* —  $\text{FeO}$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{NiO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{BaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{Cu}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$  и др. Кроме указанных оксидов в шлаках встречаются и *амфотерные* оксиды, ведущие себя с сильными кислотами как основания, а с сильными основаниями — как кислоты. К таким оксидам относятся  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{V}_2\text{O}_5$  и др. Основные шлаки ( $n \geq 2$ ), богатые  $\text{CaO}$ ,  $\text{MnO}$ , хорошо очищают металл от фосфора, серы и активно легируют его марганцем, но слабо легируют металл кремнием и плохо удаляют из него кислород (в виде закиси железа). Кислые шлаки ( $n \leq 2$ ) активно легируют шов кремнием и хорошо связывают закись железа, но плохо очищают металл шва от серы и фосфора.

Сварочные шлаки характеризуются следующими физическими свойствами: тепловыми константами — температурой плавления или размягчения, теплоемкостью, скрытой теплотой плавления и теплосодержанием; вязкостью в жидком состоянии; газопроницаемостью; плотностью в жидком состоянии; свойствами, определяющими отделяемость шлака от металла шва в твердом состоянии.

*Газовая фаза* характеризуется наличием паров металла, компонентов шлака, защитных газов и продуктов диссоциации сложных соединений, которые пребывают в столбе дуги (табл. 2).

В зоне горения дуги органические соединения в присутствии кислорода разлагаются по схеме



Пары воды при сварочном процессе диссоциируют по уравнению



Сварочные материалы всегда содержат адсорбированную влагу, которая по норме должна составлять 0,1—0,3 %, но при хранении (3—4 недели) содержание влаги может превысить

## ОБЪЕМНЫЙ СОСТАВ ГАЗОВОЙ ФАЗЫ (В %)

| Составляющие     | Сварка в газовой среде |                |                        | Сварка электродами с покрытиями вида |                               |                               |
|------------------|------------------------|----------------|------------------------|--------------------------------------|-------------------------------|-------------------------------|
|                  | Воздух                 | Углекислый газ | Аргон                  | «Ц»                                  | «А»                           | «Б»                           |
| CO <sub>2</sub>  | —                      | 42,5           | —                      | 0,4                                  | 0,9                           | 19                            |
| CO               | —                      | 38             | —                      | 42                                   | 53                            | 57                            |
| H <sub>2</sub> O | —                      | 0,02—0,065     | 0,004                  | 6,5                                  | 8                             | 15                            |
| H <sub>2</sub>   | —                      | —              | —                      | 48                                   | 35                            | 3                             |
| N <sub>2</sub>   | 78                     | —              | 0,01—0,1               | 2,5                                  | 2,5                           | 2,5                           |
| O <sub>2</sub>   | 21                     | 19             | (3—5)·10 <sup>-3</sup> | 3·10 <sup>-3</sup>                   | 8·10 <sup>-2</sup>            | 3                             |
| Остальное        | Примеси                | —              | Ar                     | C <sub>x</sub> H <sub>y</sub>        | C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> | C <sub>x</sub> H <sub>y</sub> |

Примечание. В таблице приведены усредненные данные для температуры 2700 °С без учета паров металлов и компонентов шлака.

эту норму. В сварочное пространство влага может попадать также в виде ржавчины [Fe(OH)<sub>3</sub>], покрывающей сварочную проволоку или поверхность свариваемого изделия. Азот в сварочное пространство попадает из воздуха. Растворяясь в металле, он почти полностью остается в шве. Поэтому качество газовой и шлаковой защиты от воздуха определяют по содержанию азота в шве.

| Способы сварки                                                                                           | Массовое содержание азота, % |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------|
| Ручная сварка электродами с покрытием вида «Ц», «А», «Р», «Б» . . . . .                                  | 0,015—0,024                  |
| Сварка под слоем флюса . . . . .                                                                         | 0,002—0,003                  |
| Сварка в среде CO <sub>2</sub> . . . . .                                                                 | 0,015—0,025                  |
| Сварка без дополнительной защиты от воздуха проволокой сплошного сечения Св-20ГСТЮ, Св-15ГСТЮЦ . . . . . | 0,05—0,07                    |

Кислород в газовой фазе (исключая сварку без защиты от воздуха) попадает в зону из-за диссоциации оксида CO<sub>2</sub> по уравнению



Свободного кислорода в газовой фазе тем больше, чем больше в ней углекислого газа (см. табл. 2), поэтому защита металла углекислотой, по существу, осуществляется только от взаимодействия с азотом воздуха.

При использовании толстообмазанных электродов свободный кислород попадает в зону сварки из покрытия, которое имеет мрамор (вида «Б»). Мрамор при нагреве выше 900 °С разлагается по уравнению



Электроды и флюсы, не имеющие углекислых соединений, дают газовую фазу с незначительным количеством кислорода (электроды с покрытиями «Ц» и «А»). Это указывает на то, что имеющиеся в покрытиях, флюсах, шлаках окислы являются второстепенными источниками газообразного кислорода. Практика показывает, что даже при незначительном содержании кислорода (3—10 %) газовая фаза многих металлов (железо, хром и более активные) при температуре капли является окислительной.

### **Взаимодействие между расплавленным металлом, газовой средой и шлаком**

При сварке плавлением с развитием окислительных процессов возникает необходимость раскисления металла. Однако проведение одной операции раскисления недостаточно для получения сварного соединения необходимого качества, так как наплавленный металл теряет некоторые полезные примеси в результате не только окисления, но и прямого *испарения* под действием высоких температур. Летучие компоненты (марганец — в сталях; магний, свинец, цинк — в цветных сплавах) приводят и к загрязнению окружающей зоны сварки токсичными парами. Для уменьшения испарения легирующих элементов стремятся сократить стадию капли, проводя сварочный процесс короткой другой. Потери от испарения отдельных элементов компенсируют увеличением их содержания в проволоке, покрытии. Окисление металла происходит в результате взаимодействия его с кислородом газовой фазы и с окислами, содержащимися в покрытиях, флюсах, шлаках. Окислительная способность газовой фазы характеризуется содержанием в ней свободного кислорода. Окислительная способность покрытий, флюсов, шлаков характеризуется содержанием в них окислов ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MnO}_2$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{SiO}_2$  и др.).

Рассмотрим несколько отрицательных последствий процессов окисления.

1. Потеря легирующих элементов связана с окисляемостью их, которая прямо пропорциональна родству к кислороду. Преимущественно окисляются элементы, имеющие большее это родство: Ti, Al, C, Si, Mn, Cr (рис. 31). Окислы легирующих элементов в сплавах не растворяются и концентрируются на поверхности металла, образуя шлак (или растворяются в шлаке).

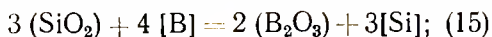
2. Насыщение металлической ванны газообразным кислородом, который растворяется в ней и попадает главным образом в результате растворения в металле окисла — основы сплава. Окисление железа и насыщение металла кислородом происходят в процессе сварки под флюсами, которые имеют повышен-

ное содержание окислов  $MnO$  и  $SiO_2$  (Ан-348А, ОСЦ-45 и др.):



В этих реакциях  $FeO$  частично растворяется в шлаке и частично переходит в металл. Подобное явление происходит при сварке сталей электродами, которые имеют покрытия вида «А», где содержится большое количество руд металлов: железной руды (гематит)  $Fe_2O_3$ ; ильменитового (титанового) концентрата; марганцевой руды (пирролизит)  $MnO_2$  (электроды марок ОММ-5, ЦМ-7 и др.).

3. Легирование сплава нежелательными элементами наблюдается, например, при сварке хромоникелевых аустенитных сталей и некоторых бронз, когда осуществляется дополнительное легирование шва кремнием. Переход кремния из шлака в металл происходит в результате развития реакции (14), действие которой усиливается при наличии в стали элементов с большим сродством к кислороду ( $B$ ,  $Al$ ,  $Ti$ ):



Развитие реакций (15), (16) и переход растворимых окислов из шлака в металл делают совершенно недопустимым присутствие большинства окислов и шлаков при сварке титановых и алюминиевых сплавов. Для сварки подобных сплавов используют бескислородные флюсы, которые составляют из солей металлов ( $CaF_2$ ,  $KF$ ,  $NaF$ ,  $KCl$ ,  $NaCl$ ), или инертные газы.

При сварке углеродистых или низколегированных сталей предотвращение окисления железа достигается легированием сварочной проволоки элементами с большим сродством к кислороду ( $Mn$ ,  $Si$ ,  $Ti$ ,  $Al$ ), которые окисляются в первую очередь.

Для борьбы с окислением применяются проволоки Св-08ГС, Св-08Г2С для сварки в среде углекислого газа и проволоки Св-20ГСЮТ, Св-15ГСЮТЦ для сварки без дополнительной защиты от воздуха.

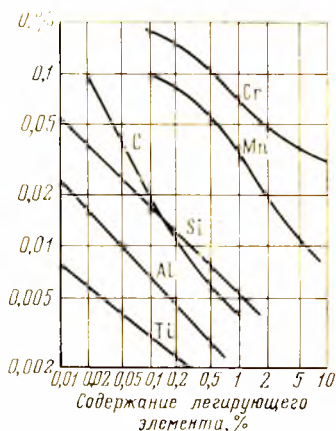


Рис. 31. РАСКИСЛЯЮЩАЯ СПОСОБНОСТЬ ЛЕГИРУЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ В СТАЛИ ДЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ 1600 °C

\* Здесь и далее в круглых скобках указаны вещества, находящиеся в шлаке, а в квадратных — в металле.

Сварку электродами с покрытием вида «А» проводят с добавлением в покрытие марганца, который при плавлении создает условие для перевода окислов в низшие, обладающие меньшей окислительной способностью:

в электродах ОММ-5  $\text{MnO}_2 + \text{Mn} = 2\text{MnO}$ ;

в электродах ЦМ-7  $\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Mn} = \text{MnO} + 2\text{FeO}$ .

Кроме указанных мер, расплавленный металл на стадии ванны подвергается раскислению.

Окисление металла при сварке может играть не только отрицательную, но и положительную роль, так как окисление углерода, серы, фосфора приводит к рафинированию металла.

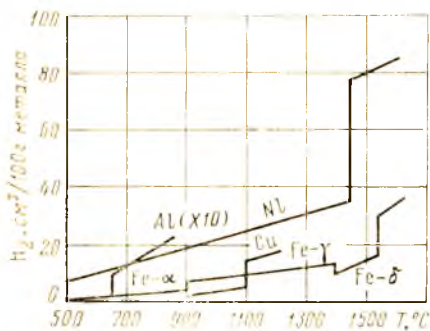


Рис. 32. РАСТВОРИМОСТЬ ВОДОРОДА В МЕТАЛЛАХ ПРИ ДАВЛЕНИИ МОЛЕКУЛЯРНОГО ВОДОРОДА 100 КПА

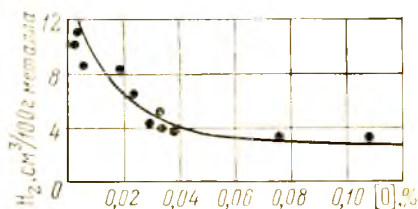


Рис. 33. ВЛИЯНИЕ КИСЛОРОДА В ЖЕЛЕЗЕ НА РАСТВОРИМОСТЬ В НЕМ ВОДОРОДА

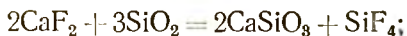
Кроме этого, растворенный в металле кислород резко уменьшает растворимость водорода.

В большинстве технических металлов и сплавов активно растворяются водород и азот. Растворимость газов зависит от концентрации их в среде, от температуры, агрегатного и аллотропического состояния металла (рис. 32). Растворимость азота и водорода в металле подобна, и при затвердевании ванны она резко снижается; из-за этого при насыщении жидкого металла газами в шве могут образоваться поры, которые снижают пластичность и ударную вязкость сварных соединений, а водород может служить причиной образования в металле трещин. Для ограничения попадания азота и водорода в сварочную ванну применяют технологические и металлургические средства. Технологические средства предусматривают: совершенствование защиты от воздуха, очистку проволоки и свариваемых кромок от окисных пленок и влаги, прокалку электродов и флюсов, осушку газов. Металлургические средства позволяют ограничить поступление водорода и азота из газовой фазы в металл и удалить их из сварочной ванны. При сварке сталей металлургические средства обеспечивают связывание водорода в газовой фазе



с кислородом и фтором в термически прочные нерастворимые в металле газообразные соединения  $\text{OH}$  и  $\text{HF}$ .

Соединение кислорода с водородом наиболее полно реализуется при сварке в среде углекислого газа. Связь водорода с фтором осуществляется при сварке под высококремнистыми фторсодержащими флюсами (например, АН-348А, ОСЦ-45). Фтор выделяется из газа тетрафторида кремния, который получается в результате взаимодействия плавикового шпата с кремнеземом:



Насыщение металла кислородом снижает растворимость водорода в нем (рис. 33). Такой способ уменьшения водорода в шве используется при сварке сталей электродами с покрытием вида «А» и при сварке под высококремнистыми высокомарганцовистыми флюсами. Удаление водорода из жидкой металлической ванны осуществляется в процессе образования газа  $\text{CO}$ , который получается в результате раскисления ванны углеродом. В этом случае водород активно проникает в пузырьки  $\text{CO}$  и выносится с ними из металла. Азот, растворенный в металле, соединяется в тугоплавкие нитриды, которые частично удаляются в шлак, а оставшиеся в жидком металле оказывают модифицирующее действие при кристаллизации шва. Такой способ уменьшения азота в сварном соединении реализуется при дуговой сварке без дополнительной защиты от воздуха проволоками сплошного сечения Св-20ГСЮТ, Св-15ГСЮТЦ и порошковыми проволоками ПП-АН1, ПП-АН3. С этой целью проволоки легированы элементами  $\text{Ti}$ ,  $\text{Al}$ , которые образуют нитриды  $\text{TiN}$  и  $\text{AlN}$  с температурой плавления соответственно 2959 и 2200 °С. Содержание азота в металле, наплавленном такими проволоками, в 2—3 раза больше, чем при сварке в среде  $\text{CO}_2$ .

При сварке трубопроводов и других ответственных конструкций применяется ток обратной полярности, который обеспечивает в 1,5—2 раза меньше (при прочих равных условиях) содержание водорода и азота в шве, чем при сварке на прямой полярности или на переменном токе.

### Легирование металла сварных соединений

Для обеспечения высокого качества и эксплуатационных свойств в ряде случаев металл шва отличается от основного металла, в частности по содержанию различных легирующих элементов. Легирование наплавленного металла проводится при соблюдении двух важных требований: в качестве раскислителей необходимо применять элементы, сродство которых к кислороду больше, чем у легирующего элемента; вместе с легирующим элементом целесообразно вносить в зону сварки и его окисел, который сохраняет легирующий элемент от выгорания.



Легирование наплавленного металла осуществляют как через металлическую, так и через шлаковую фазу. В этом случае предусматривается несколько вариантов:

легирование через проволоку сплошного сечения является основным способом при сварке в среде защитных газов и при электрошлаковом процессе; этот способ применяют также при сварке высоколегированных сталей и сплавов под слоем плав-  
леных флюсов и толстопокрытыми стержневыми электродами;

введение легирующих элементов в виде порошков чистых металлов или ферросплавов в электродные покрытия вида «Б», «Р», «Ц», керамические флюсы и во флюсы порошковых проволок;

одновременное легирование через проволоку сплошного сечения и флюс;

легирование на основе восстановления элементов от окислов, находящихся в шлаке, металлом — основой сплава; этот способ применяют при автоматической сварке под флюсом углеродистых и низколегированных сталей для обогащения сварочной ванны Mn и Si; восстановителем является железо [см. уравнения (13), (14)]; для дополнительного легирования наплавленного металла марганцем в количестве 0,4 % и кремнием в количестве 0,2 % при сварке проволокой Св-08 флюс должен иметь около 40 % MnO и подобное количество SiO<sub>2</sub>, являясь высококремнистым и высокомарганцовистым.

Легирование возможно провести через газовую фазу, но этот процесс мало изучен. Легирование наплавленного металла протекает во всех участках зоны сварки, но особенно энергично и полно в процессе каплеобразования.

### **Раскисление и рафинирование металла при сварке плавлением**

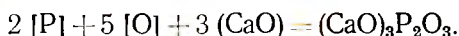
Процесс раскисления ванны при сварке позволяет проводить удаление растворенного кислорода из металла. При рафинировании происходит очищение металла от серы, фосфора, неметаллических включений и газов. Раскисление можно проводить двумя способами: диффузией растворенного в металле кислорода в шлак и химическим взаимодействием кислорода с раскислителем, при котором образуются нерастворимые в металле окислы. Раскислители обладают большим сродством к кислороду, чем металл — основа сплава. В качестве раскислителей при сварке используют углерод, водород, кремний, марганец и др. Обычно реакции раскисления протекают в следующем порядке:



В результате раскисления ванны углеродом (17) происходит снижение его концентрации, что является благоприятным фактором, хотя осуществление этой реакции в области кристаллизации металла может привести к образованию пор. В зоне кристаллизации металла при температуре ниже 1600 °С происходит активно реакция (18), которая при легировании шва кремнием в количестве более 0,15 % предотвращает образование пор. Образование нестворившихся в металле окислов ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MnO}$ ,  $\text{TiO}_2$  и др.) происходит с большой скоростью, но приводит к загрязнению шва неметаллическими включениями, которые снижают пластичность и вязкость сварных соединений.

Для уменьшения загрязнения шва неметаллическими включениями процесс проводят таким образом, чтобы продукты раскисления образовывали легкоплавкие эвтектики — шлаки, которые легко удаляются из ванны кристаллизующимся металлом на поверхность шва. Этого можно достичь при комплексном легировании шва марганцем и кремнием (соотношение 2,5 : 1).

Серу и фосфор из ванны удаляют шлаком в соответствии со следующими реакциями:



В процессе сварки отмечается, что, чем сильнее в шлаке активность окислов кальция, тем больше происходит смещение реакции вправо и полнее удаляются из металла сера и фосфор. Наилучшими рафинирующими свойствами обладают высокоосновные шлаки, богатые  $\text{CaO}$ . Подобные шлаки образуются при плавлении покрытия вида «Б». Серу из сварочной ванны можно удалить частично в шлак при легировании металла марганцем, который образует с серой тугоплавкое соединение  $\text{MnS}$  (температура плавления 1620 °С). Этот металлургический способ борьбы с серой является основным, когда шлаки не содержат  $\text{CaO}$  и имеют малую основность (флюс марки АН-348А, покрытия вида «А»). Сера и фосфор относятся к вредным примесям, которые снижают стойкость швов против образования горячих и холодных трещин, вязкость и хладостойкость металла шва.

### ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ ПРОЧНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Прочность конструкции в процессе ее технологической обработки на заводе, строительной площадке характеризуется технологической прочностью и в условиях эксплуатации — эксплуатационной прочностью. При изготовлении сварной конструкции часто в ней возникают различного рода напряжения, которые могут быть значительно выше эксплуатационных, что может привести к недопустимым деформациям и разрушению. В зависимости от размеров и влияния на прочность металла различают две категории местных разрушений или трещин. К первой категории относятся микротрещины, размеры которых соизмеримы с параметрами кристаллической решетки. Эти трещины относятся к несовершенству кристаллической решетки и имеются в любых реальных кристаллах. Ко второй категории относятся трещины больших размеров, возникновение которых связано с технологической обработкой или с эксплуатацией конструкции. Трещины второй категории в сварных конструкциях являются опасным дефектом и при действии незначительных эксплуатационных нагрузок могут привести к серьезным авариям. При сварке в зависимости от температурного интервала возникновения различают трещины кристаллизационные или горячие и холодные.

#### ГОРЯЧИЕ ТРЕЩИНЫ

Одним из распространенных дефектов сварки в процессе кристаллизации металла являются горячие трещины, которые представляют хрупкое межкристаллическое разрушение. Температура, при которой образуются горячие трещины, зависит от химического состава металла шва и для углеродистых конструкционных сталей соответствует 1200—1350 °С.

Горячие трещины в зависимости от их расположения в металле шва столбчатого строения и в околошовной зоне бывают продольные и поперечные. Продольные трещины обычно располагаются по оси шва в месте стыка столбчатых кристаллитов или между кристаллами. Поперечные трещины располагаются между кристаллами. Иногда наблюдаются несплошности в металле шва, которые являются комбинацией продольных и поперечных трещин.

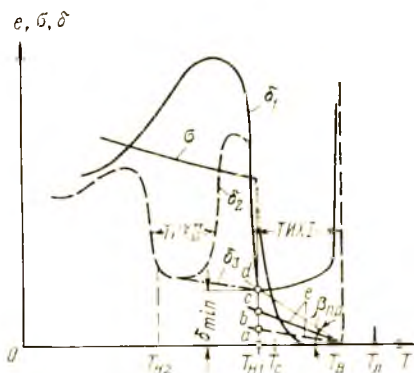
При дуговой сварке в шве встречаются трещины как выходящие, так и не выходящие на его поверхность. При электрошлаковой сварке горячие трещины располагаются, как правило, в средней части шва и не выходят на его поверхность, что обусловливается особенностями кристаллизации шва с принудительным формированием.

Затвердевание наплавленного металла шва происходит в условиях воздействия растягивающих напряжений, возникающих в результате неравномерного нагрева и охлаждения свариваемого металла, жесткого закрепления свариваемых изделий и, следовательно, затруднительного сокращения металла шва при остывании. Указанные механические условия были положены Н. Н. Прохоровым в основу теории образования горячих трещин.

Изображенная на рис. 34 зависимость деформационной способности сплава от температуры определяется экспериментально. Внутренняя деформация  $e_{вн}$  включает в себя дефор-

Рис. 34. СХЕМА НАРАСТАНИЯ ДЕФОРМАЦИИ В СВАРНОМ ШВЕ  $e$ , ИЗМЕНЕНИЯ ЕГО ПРОЧНОСТИ  $\sigma$  И ПЛАСТИЧНОСТИ  $\delta$  В ПРОЦЕССЕ ОХЛАЖДЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ (ТРЕЩИНЫ НЕ ОБРАЗУЮТСЯ):

$T_L$  и  $T_C$  — температуры ликвидуса и солидуса;  $\delta_1$ ,  $\delta_2$ ,  $\delta_3$  — пластичности затвердевающего металла;  $T_B$ ,  $T_{H1}$ ,  $T_{H2}$  — верхняя и нижние границы температурного интервала хрупкости ТИХ I и ТИХ II



мацию формоизменения  $e_{\phi}$  и деформацию, создаваемую усадкой металла в свободном состоянии  $e_{св}$ . При охлаждении сварного шва  $e_{вн} = e_{\phi} - e_{св}$ .

Во время кристаллизации шва деформация нарастает при изменении температуры по закону, близкому к линейному. В этом случае можно приравнять интенсивность нарастания деформации, которая выражается первой производной деформации по температуре, постоянной величине  $\alpha_{вн}$

$$\frac{de_{вн}}{dT} = \alpha_{вн},$$

где  $\alpha_{вн}$  — темп внутренней деформации.

Исследования деформационной способности сплавов показали, что в интервале кристаллизации имеет место температурный интервал хрупкости (ТИХ), где пластичность металла измеряется долями процента и разрушение имеет хрупкий межкристаллический характер. Этапу кристаллизации металла соответствует верхний предел температурного интервала хрупкости, когда пластичность жидко-твердого металла резко падает при деформации, что связано с заклиниванием кристаллов и устранением циркуляции жидкой фазы вокруг них. Заклинивание кристаллов выше верхней границы не происходит.

Нижняя граница температурного интервала хрупкости определяется температурой, где сопротивление металла деформированию по границам зерен больше, чем сопротивление пластической деформации объемов кристаллов. Граница в этом случае определяется по резкому росту пластичности, прочности и переходу от хрупкого разрушения к вязкому.

При выделении легкоплавких неравновесных эвтектик по границам зерен, а для однофазных сплавов — с образованием высокого уровня химической и физической микросооднородности по «новым» границам кристаллов значение нижней границы температурного интервала хрупкости проходит ниже линии солидуса. В данном случае предполагается, что горячие трещины возникают в металле твердого состояния и механизм их образования аналогичен высокотемпературной ползучести. Для этих условий характерен второй интервал пониженной пластичности, отмеченный на рис. 34 штриховой линией.

Так как сплавы обладают малой прочностью и отсутствием пластичности в температурном интервале хрупкости, то предполагают, что трещины образуются в температурном интервале хрупкости. На графике момент образования трещины условно обозначен пересечением линии деформации  $\epsilon$  с линией пластичности  $\delta$ . Согласно теории Н. Н. Прохорова, вероятность образования горячих трещин зависит от следующих факторов: темпа деформации металла в температурном интервале хрупкости; пластичности металла в этом интервале; температурного интервала хрупкости. Меньший темп деформации, большая пластичность металла в температурном интервале хрупкости и меньший температурный интервал хрупкости обеспечивают меньшую вероятность образования горячих трещин.

Запас технологической прочности имеет место, если за время пребывания металла в температурном интервале хрупкости накопленная деформация не исчерпывает его пластичности  $\delta_{\min}$ . Абсолютный запас технологической прочности может быть представлен в следующем виде:

$$\Delta \epsilon_3 = \delta_{\min} - e_{\text{вн}} = \delta_{\min} - \Delta \epsilon_{\text{ф}} - \Delta \epsilon_{\text{св}} = \delta_{\min} - ab - bc, \quad (20)$$

где  $ab$  — деформация формоизменения  $\Delta \epsilon_{\text{ф}}$ , накопленная в шве за время пребывания металла в температурном интервале хрупкости;  $bc$  — деформация, накопленная от усадки  $\Delta \epsilon_{\text{св}}$ . Здесь  $e_{\text{ф}}$  имеет знак плюс согласно рис. 34.

Если введем обозначения  $\Delta \epsilon_{\text{св}} = \alpha_{\text{св}} \Delta T_{\text{x}}$ ;  $\Delta \epsilon_{\text{ф}} = \alpha_{\text{ф}} \Delta T_{\text{x}}$ ;  $\Delta \epsilon_3 = \alpha_3 \Delta T_{\text{x}}$ ,  $\delta_{\min} = \alpha_{\text{пр}} T_{\text{x}}$ , то из зависимости (20) получим

$$\alpha_3 = \alpha_{\text{пр}} - \alpha_{\text{св}} - \alpha_{\text{ф}}.$$

Эти выражения можно представить как темпы деформации  $\alpha_{\text{св}} = d\epsilon_{\text{св}}/dT$  и  $\alpha_{\text{ф}} = d\epsilon_{\text{ф}}/dT$ , обусловленные температурой, усадкой и формоизменением изделия, а  $\alpha_{\text{пр}}$  — предельный темп де-



формации сплава, равный  $\operatorname{tg} \beta_{\text{пр}}$ , где  $\beta_{\text{пр}}$  — угол между осью ординат и касательной к кривой  $\delta_1$ .

Показателем технологической прочности сплава является разность  $\alpha_{\text{пр}} - \alpha_{\text{св}}$ , определяющая максимальный темп деформации, который сплав может выдержать без разрушения. Сплав с наибольшим этим показателем имеет минимальную вероятность образования горячих трещин и может применяться в сварочных конструкциях с наибольшим уровнем развития деформаций при сварке.

Для определения запаса технологической прочности удобно пользоваться относительным показателем запаса технологической прочности

$$K_T = (\alpha_{\text{пр}} - \alpha_{\text{св}} - \alpha_{\text{ф}}) / \alpha_{\text{ф}}.$$

Если  $\alpha_{\text{пр}} - \alpha_{\text{св}} \leq \alpha_{\text{ф}}$ , то  $K_T \leq 0$ , что приводит к возникновению трещин в металле шва или в околошовной зоне.

### **ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ МЕТАЛЛОВ ПРИ СВАРКЕ В ПРОЦЕССЕ КРИСТАЛЛИЗАЦИИ**

Для оценки технологической прочности в процессе кристаллизации ванны при сварке сравнивают между собой металлы, сварочные материалы и технологические процессы по признаку их влияния на возникновение горячих трещин. Имеется много методов оценки технологической прочности, которые по назначению можно разделить на две группы:

испытание сварных образцов в специальных установках с принудительным изменением темпа формоизменения; эти испытания позволяют получить количественную оценку технологической прочности сплавов;

определение технологической прочности с использованием технологических проб, которые можно разделить на две подгруппы: качественные и количественные; качественные пробы выполняют в виде сварных узлов с различной конструктивной жесткостью, моделируя технологический процесс.

Эти испытания позволяют разделить сплавы на две группы: разрушающиеся в условиях сварки и неразрушающиеся. Наиболее полную характеристику свариваемости сплавов отражают количественные методы испытаний.

Методика МВТУ им. Н. Э. Баумана, предложенная в 1949 г. Н. Н. Прохоровым, заключается в том, что к образцу (рис. 35, а), установленному в зажимах испытательной машины, в процессе сварки канавки прикладывается внешняя сила, противоположная по знаку усадочной деформации. Для случая, когда зажимы не перемещаются, образец при остывании не изменяет своих размеров ( $\alpha_{\text{ф}} = 0$ ) и условия прочности записываются в следующем виде:  $\alpha_{\text{пр}} = \alpha_{\text{св}} + \alpha_0$ . В этой формуле сла-

гаемое  $\alpha_0$  учитывает погрешность, получаемую от нагрева металла между швом и зажимами машины. При испытании сваривают несколько образцов до образования в шве трещины. При этом увеличивают деформацию, создаваемую перемещением зажимов машины. Для этого случая условия технологической прочности можно выразить формулой  $\alpha_{пр} = \alpha_{св} + \alpha_{м} + \alpha_0$ , где  $\alpha_{м}$  — темп принудительной деформации образца. Эта вели-

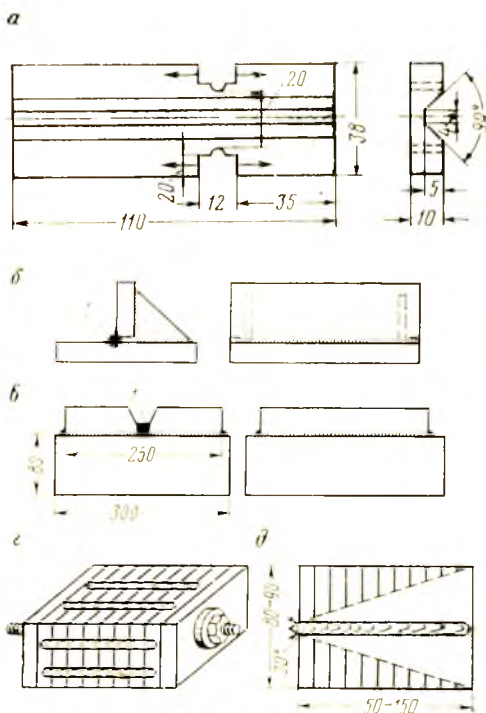


Рис. 35. ОБРАЗЦЫ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ НА СТОЙКОСТЬ МЕТАЛЛА ШВА ПРОТИВ ОБРАЗОВАНИЯ КРИСТАЛЛИЗАЦИОННЫХ ТРЕЩИН

чина принимается в качестве показателя технологической прочности металла сварного шва в процессе кристаллизации. Следовательно, показатель технологической прочности  $\alpha_{пр} - \alpha_{св}$  равен темпу принудительной деформации образца.

Качественную характеристику стойкости против образования горячих трещин (рис. 35, б, в) дает технологическая проба, имитирующая реальные сварные соединения (тавровые, стыковые). Эта проба используется для оценки свойств основного металла, сварочных материалов и определения пригодности способов и режимов сварки. Контрольный шов 1 сваривают на режиме, оптимальном для данного способа сварки, марки стали

и толщины металла, или на разрабатываемом режиме при проверке новых режимов сварки. Трещины выявляются после сварки внешним осмотром поверхности шва, излома шва после разрушения или по макрошлифам, вырезанным из шва. Для получения количественной характеристики стойкости против образования трещин проводят сварку на различных токах, изменяя коэффициент формы провала. Чем больше ток, при котором еще не наблюдается образования трещин, тем лучше свойства испытываемого металла.

К группе технологических проб относятся образцы составные и переменной жесткости (рис. 35, г, д). В образцах этого типа производят наплавку на отдельные полосы или сегменты, скрепленные между собой прихватами или закрепленные в жестком приспособлении. Стойкость против образования кристаллизационных трещин определяют качественно по наличию или отсутствию трещин на поверхности шва и в изломе образца.

Представление о стойкости металла шва против образования горячих трещин можно получить, используя контрольный химический анализ. В этом случае сравнивают данные химического анализа по вредным примесям (главным образом серы и углерода) для реального сварного соединения с критическим их содержанием, регламентированным техническими условиями на данный вид продукции.

### **СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

Повысить технологическую прочность сварной конструкции можно уменьшением темпа деформации формоизменения сплава, а также подбором свариваемого металла, присадочной проволоки и режимом сварки, которые позволили обеспечить наивысшее значение показателя технологической прочности. На практике для уменьшения предельного темпа деформации формоизменения  $\alpha_f$  пользуются различными технологическими приемами. Для уменьшения поперечной составляющей  $\alpha_f$  в начале и конце шва при сварке встык листовых конструкций в процессе монтажа в этих местах приваривают технологические планки, создавая жесткое закрепление или обеспечивая направление сварки от центра к краю свариваемых листов. Возрастание поперечной составляющей темпа деформации формоизменения происходит также в тех зонах шва, которые имеют интенсивный нагрев связей, испытывающих растягивающие усилия. Это относится к расплавлению прихваток, наложенных с большим шагом при наплавке перекрещивающихся швов, а также в конце стыкового шва при двухпроходной сварке, в случае проплавления последнего участка первого слоя, испытывающего растягивающие напряжения. В последнем случае рекомендуется второй шов накладывать с неболь-

шой погонной энергией или концы шва сваривать в направлении от края к середине листа. Сопутствующий подогрев свариваемого изделия параллельно шву газовой горелкой или дугой с неплавящимся электродом значительно снижает темп деформации формоизменения. Указанное обстоятельство выполняется также при сварке такими методами, которые обладают наибольшей проплавающей способностью (электронный луч, плазменная дуга, импульсная дуга и т. д.). Устранение концентраторов напряжений, вызванных формой шва и подготовкой кромок под сварку (рис. 36), существенно снижает темп деформации формоизменения.

Для повышения показателя технологической прочности ( $\alpha_{цр} - \alpha_{св}$ ) металла шва при сварке среднеуглеродистых, высокоуглеродистых, низколегированных и среднелегированных

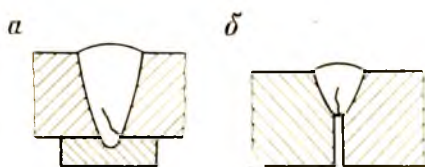


Рис. 36. ВИДЫ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ С ПОВЫШЕННОЙ КОНЦЕНТРАЦИЕЙ ДЕФОРМАЦИИ В МЕТАЛЛЕ ШВА ПРИ ЕГО ЗАТВЕРДЕВАНИИ:

*a* — с остающейся подкладкой; *б* — с неприваром

сталей снижают количество углерода в электродных стержнях и электродной проволоке. При выполнении сварки легированных сталей одновременно уменьшают и содержание легирующих элементов, усиливающих отрицательное влияние углерода. Наплавленный металл среднелегированных сталей дополнительно легирует марганцем и хромом, благоприятно влияющими на стойкость металла шва против образования горячих трещин.

### ХОЛОДНЫЕ ТРЕЩИНЫ

Холодные трещины представляют хрупкое разрушение металла сварного соединения. Трещины образуются при температуре 100—200 °С во время охлаждения конструкции, а также в течение последующих нескольких суток после сварки. Холодные трещины возникают чаще всего в сварных соединениях среднелегированных и высоколегированных сталей перлитного и мартенситного классов, претерпевающих полную или частичную закалку. Образование холодных трещин при сварке можно рассматривать как один из случаев замедленного разрушения закаленной стали под действием остаточных сварочных напряжений. Холодные трещины могут возникать иногда в шве, чаще в зоне термического влияния. Они состоят из двух участков: очага разрушения и участка развития трещины. Хрупкое разрушение в зоне очага проходит по границам зерен на длине одного или нескольких зерен. Участок развития трещины имеет протяженность во много раз большую, чем очаг разру-

шения, и трещина проходит как по границам, так и по телу зерен. Трещина во время развития сопровождается пластической деформацией окружающего металла.

Появление трещин объясняется наличием фазовых и структурных превращений, в результате которых появляются нестабильные хрупкие структуры типа мартенсита, отличающиеся высокой твердостью и малой пластичностью. Для определения ожидаемой структуры и свойств свариваемой стали необходимо иметь диаграмму термокинетического распада аустенита, т. е. распада, протекающего при непрерывном охлаждении, или диаграмму изотермического распада аустенита (рис. 37). В случае С-образной формы кривых начала и конца распада аустенита ко-

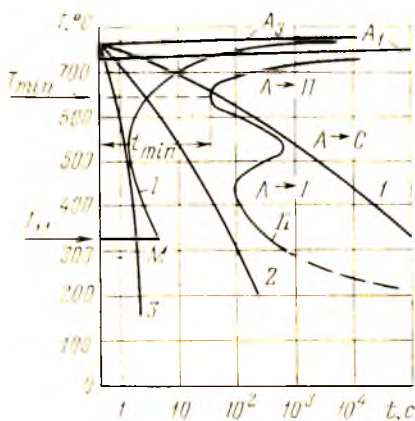


Рис. 37. ДИАГРАММА ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ПРЕВРАЩЕНИЯ АУСТЕНИТА В УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ:

A — аустенит; M — мартенсит; П — перлит; С — сорбит; Т — троостит; I и II — кривые начала и окончания распада аустенита соответственно;  $T_M$  — температура мартенситного превращения

денции, или диаграмму изотермического распада аустенита (рис. 37). В случае С-образной формы кривых начала и конца распада аустенита ко-

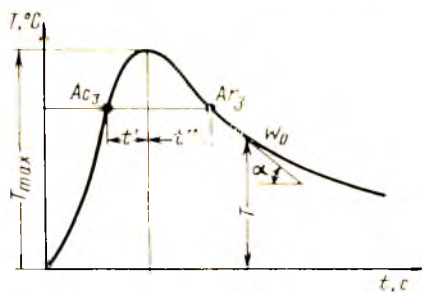


Рис. 38. ТЕРМИЧЕСКИЙ ЦИКЛ ОКОЛОШОВНОЙ ЗОНЫ ПРИ ОДНОПРОХОДНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКЕ ИЛИ НАПЛАВКЕ

нечная структура металла будет зависеть от скорости охлаждения в пределах верхнего субкритического интервала температур ( $T_{A_1} - T_{\min}$ ). Для получения полностью перлитного превращения необходимо, чтобы кривая охлаждения находилась не ниже кривой 1. Если кривая охлаждения пройдет ниже кривой 3, то структура будет полностью мартенситной, а при промежуточных значениях скоростей охлаждения (кривая 2) структура металла будет смешанной. Критическую скорость охлаждения  $\omega_{кр}$  для стали, при которой мартенсит будет полностью исключен, можно определить по формуле

$$\omega_{кр} = [T_{A_1} - (T_{\min} - 55)] / 3t_{\min},$$

где  $T_{A_1}$  — температура, соответствующая распаду аустенита при охлаждении с минимальными скоростями, °C;  $T_{\min}$  — тем-



пература минимальной устойчивости аустенита при распаде в изотермических условиях, °C;  $t_{\min}$  — минимальное значение инкубационного периода начала распада аустенита, с. Поправка к  $T_{\min}$  в 55°C в формуле для стали соответствует снижению  $T_{\min}$  при непрерывном охлаждении в сравнении с  $T_{\min}$  при изотермическом распаде.

Для получения сварного соединения без трещин необходимо учитывать основные параметры термического цикла нагрева и охлаждения металла околошовной зоны (рис. 38): максимальную температуру нагрева  $T_{\max}$ ; скорость нагрева  $\omega_n$  при 700—1000 °C; скорость охлаждения  $\omega_o$  в интервале температур 500—600 °C,  $\omega_o = dT/dt = \operatorname{tg} \alpha$ ; длительность нагрева  $t'$  от точки  $Ac_3$  до  $T_{\max}$ ; длительность охлаждения  $t''$  от точки  $T_{\max}$  до  $Ar_3$ .

Структура металла околошовной зоны после охлаждения до нормальной температуры зависит от структуры, полученной при максимальной температуре, и от структурных превращений при охлаждении. Высокий и длительный перегрев металла способствует росту аустенита и выравниванию состава, что при охлаждении способствует его неполному распаду и образованию хрупкой структуры мартенсита. Быстрый нагрев и малое время пребывания металла в области температур выше точки  $Ac_3$  приводят к образованию неустойчивого аустенита с мелкими зернами, который при одинаковых условиях охлаждения распадается до сорбита или даже перлита. Следовательно, применение повышенной скорости охлаждения перегретого металла околошовной зоны с укрупненным зерном приводит к образованию метастабильной структуры с возможным появлением холодных трещин.

Водород, растворенный в металле, дополнительно способствует образованию трещин. В металле водород может содержаться в атомарном виде или как протон, легко диффундируя не только при высоких температурах, но и при комнатной. Удаление водорода происходит через паружную поверхность шва, и в околошовной зоне он скапливается в порах, пустотах и локальных несовершенствах кристаллического строения металла. Часть водорода, поступая в несплошности, ассоциируется в молекулы и перестает быть диффузионно-подвижной. Это приводит к росту давления молекулярного водорода при образовании новых молекул. Распределение водорода из шва с ферритно-перлитной структурой в основной металл происходит примерно с одинаковым коэффициентом диффузии. При сварке закаливающейся стали аустенитным швом закаленная зона основного металла задерживает проникновение водорода в основной металл и коэффициент диффузии водорода в стали мартенситной структуры меньше, чем ферритно-перлитной. Поэтому появление трещин в околошовной зоне в процессе сварки связано с закалкой и действием водорода, растворяющегося в металле шва. Чем больше проявляется склонность металла



к закалке, тем при меньшем содержании водорода в наплавленном металле обнаруживаются холодные трещины в околошовной зоне сварных соединений.

## ОЦЕНКА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПРОЧНОСТИ СТАЛИ В ПРОЦЕССЕ ПРЕВРАЩЕНИЙ АУСТЕНИТА

Влияние фазовых превращений на структуру, свойства и технологическую прочность металлов при сварке исследуют с помощью специальных испытаний, которые позволяют дифференцированно изучать процессы в отдельных участках термического влияния. Эти испытания можно разделить на три группы:

- определение кинетики фазовых превращений, изменений структуры и свойств основного металла в зоне термического влияния в условиях имитируемого термического цикла и напряженного состояния при сварке;

- определение структуры и механических свойств отдельных участков реальных сварных соединений;

- определение сопротивляемости сварных соединений образованию холодных трещин при сварке.

В первой группе испытаний предусматривается проведение исследований на сравнительно небольших образцах, в которых воспроизводятся термические циклы сварки (быстродействующий dilatометр ИМЕТ-ДБ) либо термические циклы с одновременным деформированием (методика ИМЕТ-1). Во второй группе испытаний используют валковую пробу МВТУ, пробу Шнадта и пробу Чабелки. Третья группа испытаний включает качественные и количественные пробы для оценки сопротивляемости сварных соединений образованию холодных трещин. Качественная проба служит для сравнительной оценки технологической прочности и применяется для контрольных испытаний, устанавливающих наличие или отсутствие трещин. Испытание проводят на металле наиболее применяемой толщины при максимальном содержании элементов, снижающих стойкость металла против трещин (углерод, марганец, кремний и др.). Образцы сваривают на характерных трех режимах, которые обладают максимальной, средней и минимальной для данного способа сварки погонной энергией. Для испытания часто используют образцы, имитирующие реальные сварные соединения. Трещины выявляют через 5—20 сут после сварки при внешнем осмотре поверхности металла и по макрошлифам.

Для количественной оценки стойкости металла околошовной зоны против образования трещин можно использовать образец крестовой пробы (рис. 39, а), который собирают из двух пластин, прихватываемых по торцам. Угловые швы 1, 2, 3, 4 сваривают в положении «в лодочку» при комнатной и отрицательной температурах, а также с применением сопутствующего

подогрева. Качественная оценка проводится по наличию или отсутствию трещин на макрошлифах, количественная — по минимальной температуре, при которой еще не наблюдается образования трещин. Сравнительная количественная оценка технологической прочности в процессе превращения аустенита при сварке может быть получена с использованием тавровых образцов (рис. 39, б), которые сваривают угловым швом. Перед началом превращения аустенита к образцу прикладывают постоянное усилие. За показатель сопротивляемости сталей об-

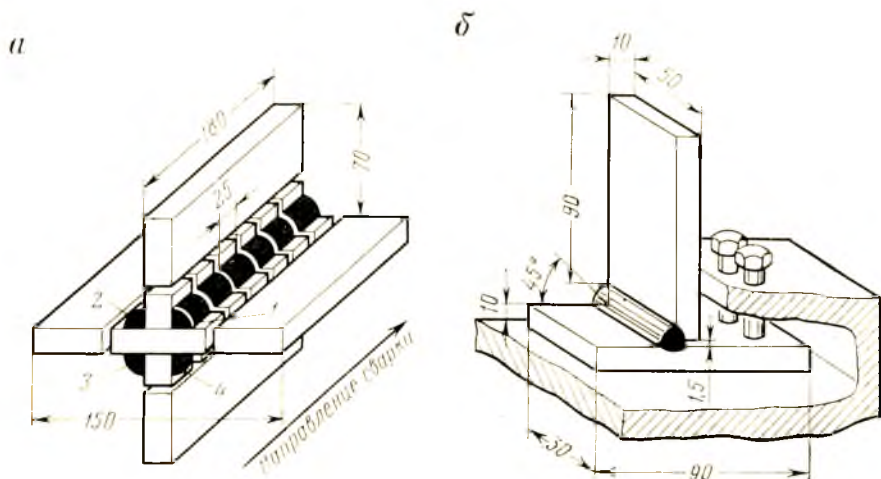


Рис. 39. ОБРАЗЦЫ ДЛЯ КОЛИЧЕСТВЕННОЙ ОЦЕНКИ СОПРОТИВЛЯЕМОСТИ СТАЛИ ПРОТИВ ОБРАЗОВАНИЯ ХОЛОДНЫХ ТРЕЩИН

разованию холодных трещин принимают минимальное напряжение, которое не вызывает трещин в течение 20 ч.

Кроме прямых методов испытаний стойкости против образования холодных трещин применяют и косвенные методы. К ним относится определение углеродного эквивалента.

### СПОСОБЫ ПОВЫШЕНИЯ СОПРОТИВЛЯЕМОСТИ СТАЛИ ОБРАЗОВАНИЮ ХОЛОДНЫХ ТРЕЩИН

Способы повышения сопротивляемости стали образованию холодных трещин при сварке закаливающихся сталей основаны на рациональном подборе состава основного металла, типа и состава электродных материалов, обеспечивающих наименьшее насыщение шва водородом, выборе режима и термических условий сварки, а также на обработке сварных соединений непосредственно после сварки. Повышение сопротивляемости сварных соединений образованию холодных тре-

щии может быть достигнуто рациональным содержанием в низколегированных сталях углерода, так как при содержании углерода меньше 0,1—0,12 % трещины практически не наблюдаются. Увеличение содержания углерода свыше 0,3—0,33 % приводит к резкому снижению сопротивляемости стали. Подобное понижение сопротивляемости стали к образованию холодных трещин наблюдается при наличии марганца и хрома в стали свыше 1 % и никеля более 1,5 %, хотя влияние этих элементов при увеличении содержания углерода становится менее значительным. Введение вольфрама в сталь более 0,3—0,5 % в некоторых случаях также приводит к образованию холодных трещин. К элементам, повышающим значение этой характеристики, относятся энергичные карбидообразующие модификаторы: ванадий, молибден и титан, а также применение раскисления стали алюминием с содержанием свыше 0,1—0,15 %.

Изменение исходной структуры стали путем предварительной термической обработки (отжиг на укрупнение карбидов, изотермическая закалка с высоким отпускком и термомеханическая обработка) способствует увеличению стойкости против образования трещин.

Уменьшение насыщения сварного соединения водородом достигается высокотемпературной прокалкой (свыше 450 °C) покрытых электродов, флюсов и осушением защитных газов. Сварку сталей, склонных к образованию трещин, рекомендуется проводить на постоянном токе обратной полярности с повышением напряжения и тока. Увеличение погонной энергии сварки благоприятно до тех пор, пока в отдельных участках околошовной зоны не начнется чрезмерное укрупнение зерна из-за перегрева. Необходимость предварительного подогрева зависит от химического состава стали, в частности от эквивалентного углерода  $C_{\text{э}}$ . Определение эквивалентного содержания углерода (в %) осуществляется по формуле Международного института сварки (МИС)

$$C_{\text{э}} = C + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{\text{Cr} + \text{Mo} + \text{V}}{5} + \frac{\text{Ni} + \text{Cu}}{15},$$

содержание в стали титана и ниобия рассматривают как аналоги ванадия с учетом коэффициента  $1/5$ . Если  $C_{\text{э}}$  для свариваемой стали имеет значение 0,4 и более, то в зависимости от толщины металла, температуры окружающей среды и марки электрода рекомендуется применять предварительный подогрев. Применение предварительного подогрева, вызывающего высокотемпературные превращения, дает довольно грубые продукты распада аустенита, что снижает механические свойства сварного соединения.

Задержка охлаждения ниже температуры начала мартенситного превращения в течение определенного периода времени

обеспечивает однородную структуру отпущенного мартенсита. Подобное регулирование термического цикла можно обеспечить сопутствующим подогревом или сваркой многослойными швами (блоками, горкой и каскадом).

Длину участка при выполнении сварки каскадом выбирают по формуле

$$l = 0,7 \frac{K_3 K_T q^2}{\delta^2 v (T_n - T_0)^2},$$

где  $K_3$  — коэффициент, равный 0,8 для крестового соединения, 0,9 для соединения в тавр и 1,5 для стыкового соединения;  $K_T$  — коэффициент горения дуги, равный единице для автоматической сварки и 0,6—0,8 для ручной;  $q$  — эффективная мощность дуги, Дж/с;  $\delta$  — толщина изделия, см;  $v$  — скорость сварки, см/с;  $T_n$  — температура охлаждения первого слоя, обычно на 50—100 °С выше температуры начала мартенситного превращения свариваемой стали, °С;  $T_0$  — начальная температура изделия, °С.

Появления холодных трещин можно избежать, если конструкцию подвергнуть низкому или высокому отпуску, особенно для сталей, где образование трещин происходит через несколько часов или суток после сварки. Охлаждение сварных соединений без отпуска вызывает распад аустенита с получением мартенсита, хрупкого и склонного к замедленному разрушению под влиянием остаточных напряжений. Поэтому время между сваркой и термообработкой для сталей различных марок может колебаться от 30 мин до нескольких часов. В том случае, когда затруднено проведение немедленного высокого отпуска, предварительно применяют низкий отпуск при температуре 250—300 °С или местный отпуск газовым плавлением с последующим высоким отпуском в печи.

---

## Глава 5

### ГАЗОПЛАМЕННАЯ И ГАЗОЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА МЕТАЛЛОВ

К газопламенной обработке металлов относят процессы, в которых местный нагрев и плавление осуществляются высокотемпературным газовым пламенем, образующимся при сгорании горючих газов или паров в струе технически чистого кислорода. В качестве горючих газов и паров при газопламенной обработке металлов используют ацетилен, водород, природные газы, пропан, бутан, их смеси и другие газы, а также пары керосина и бензина. К газопламенной обработке метал-

лов, используемых в трубопроводном и резервуарном строительстве, относятся газовая сварка, разделительная кислородная резка, термическая обработка без изменения и с изменением структуры, очистка поверхности металла от окислы, краски, ржавчины и других загрязнений.

### СВОЙСТВА ГАЗОВОГО ПЛАМЕНИ И ПРИМЕНЯЕМЫЕ ГАЗЫ

Для обработки металлов наиболее часто применяют ацетилено-кислородное пламя. Подаваемый в пламя чистый кислород обеспечивает горение и повышает температуру пламени. Полное сгорание ацетилена в кислороде выражается формулой



Реакции горения сварочного пламени, представляющие начальные и конечные стадии процесса горения ацетилена в кислороде, приблизительно можно представить протекающими в две фазы. Условно первая фаза сгорания ацетилена в кислороде происходит при их истечении из горелки в соотношении 1:1:



Во второй фазе сгорание углеводородов условно происходит за счет подсосывания в пламя кислорода воздуха:



Пламя, получаемое при сгорании ацетилена в кислороде с соотношением 1:1, называют нормальным. Практически небольшая часть водорода сгорает, превращаясь в водяной пар, кроме того, кислород имеет примеси, поэтому нормальное горение происходит при большем количестве поступающего из горелки кислорода с соотношением смеси  $\beta_0 = 1,05 \div 1,2$ . Для окислительного пламени с соотношением смеси  $\beta_0 = 1,5$  начальная стадия горения, соответствующая средней зоне пламени, выражается формулой



В этом случае средняя (рабочая) зона пламени утрачивает свои восстановительные свойства и приобретает окислительный характер. Для науглероживающего пламени при соотношении смеси  $\beta_0 = 0,5$  сгорание углеводородов в средней зоне пламени будет



Здесь в средней зоне пламени появляется значительное количество свободного углерода и зона становится науглероживаемой.



Количество теплоты  $Q$ , выделяемое единицей объема газа при полном сгорании, является постоянной величиной и идет на нагревание продуктов сгорания

$$Q = c_p V (T_2 - T_1),$$

где  $c_p$  — теплоемкость продуктов сгорания при постоянном давлении;  $V$  — объем продуктов сгорания;  $T_2$  — конечная температура продуктов сгорания;  $T_1$  — начальная температура газов. Конечная температура  $T_2 = Q / (c_p V) + T_1$ . Очевидно, что уменьшение содержания излишних «балластных» примесей в продуктах горения (при горении на воздухе примесью является азот) будет способствовать повышению окончательной температуры пламени, так как величина  $V$  в знаменателе будет меньше.

Кислород, являясь составной частью воздуха, кроме того, входит в химический состав большинства веществ. Кислород — негорючий газ, но его соприкосновение с минеральными маслами, жирами, или другими горючими веществами приводит к их самовоспламенению и порой к взрыву.

Ацетилен ( $C_2H_2$ ) — бесцветный газ без вкуса и со слабым запахом эфира. Технический ацетилен имеет резкий запах из-за наличия в нем примесей. Ацетилен вреден для организма человека, но вдыхание его в небольших количествах не опасно. Плотность ацетилена при стандартных условиях равна  $1,091 \text{ кг/м}^3$ . При повышении температуры ацетилен способен взрываться при наличии катализатора и тех или иных примесей. Чистый ацетилен взрывается при достаточно большом объеме и давлении более  $200 \text{ кПа}$ . Смесь ацетилена с воздухом взрывается при содержании ацетилена от  $2,2$  до  $81 \%$  по объему, если температура достигает  $305^\circ\text{C}$  при атмосферном давлении. При повышении давления температура воспламенения (взрыва) понижается. Взрывоопасность плохо очищенного ацетилена повышается при длительном соприкосновении его с медью или серебром, так как эти металлы дают с ацетиленом взрывчатые соединения — ацетилениды. Во время взрыва ацетилена температура возрастает и давление повышается в  $11$ — $12$  раз, что приводит к серьезным разрушениям. При температуре  $800^\circ\text{C}$  ацетилен из-за недостаточной теплоустойчивости разлагается на метан и углерод по формуле  $2C_2H_2 \rightarrow CH_4 + 3C$ . При температуре  $1200^\circ\text{C}$  происходит полное разложение ацетилена и метана по формулам:  $C_2H_2 = 2C + H_2$ ;  $CH_4 = C + 2H_2$ . Весь процесс распада ацетилена при температуре  $1200^\circ\text{C}$  носит название пирогенного разложения. Ацетилен в производственных условиях получают при воздействии воды на твердое вещество — карбид кальция ( $CaC_2$ ) по уравнению  $CaC_2 + 2H_2O = Ca(OH)_2 + C_2H_2$ . При разложении  $1 \text{ кг}$  карбида кальция водой выделяется  $250$ — $300 \text{ л}$  ацетилена. Процесс получения ацетилена из карбида кальция осуществляют

в ацетиленовых генераторах. Получение ацетилена в переносных генераторах сопряжено с рядом неудобств, особенно в тех случаях, когда приходится перемещать генератор с места на место в условиях сооружения резервуарных конструкций. Поэтому для монтажных условий часто применяют ацетиленовые баллоны.

В монтажных условиях для сварки и резки могут быть использованы пары бензина, керосина и пропан-бутановой смеси. При работе на монтажной площадке применяют подачу газов к горелкам или резакам от индивидуального кислородного баллона и ацетиленового генератора малой производительности или баллона с ацетиленом по шлангам.

## ВИДЫ ТЕПЛОЙ РЕЗКИ И ОБРАБОТКИ МЕТАЛЛОВ

Газовое пламя и другие концентрированные источники тепла могут быть использованы не только для нанесения, но и для удаления частиц металла с помощью тепловой резки из различных изделий (трубы, монтажные заготовки металлоконструкций и др.). При тепловой резке металл удаляется в расплавленном состоянии или в виде шлака с образованием на поверхности изделия канавки или углубления на кромке (рис. 40). Количество удаляемого металла при резке  $g = (l/t) b h \rho$  или  $g = \omega F \rho$ , где  $l$  — длина реза;  $t$  — время резки;  $b$  — ширина реза;  $h$  — толщина металла;  $\omega$  — линейная скорость резки;  $\rho$  — плотность металла;  $F$  — площадь поперечного сечения канавки.

В качестве источника тепла при резке используют газокислородное пламя или плазму электрической дуги.

При сооружении трубопроводов и резервуаров применяют газокислородную и дуговую резку.

*Газокислородную резку* часто называют просто кислородной резкой. Процесс газокислородной резки основан на сгорании металла в струе кислорода и удалении этой струей образующихся окислов (рис. 41). Поверхность разрезаемого изделия нагревается пламенем газокислородной смеси, проходящей через канал 1 резака. При нагреве поверхности металла до температуры воспламенения через канал 2 подается «режущий» кислород, который быстро окисляет подогретый металл. Образовавшиеся в верхнем слое реза жидкие окислы выдуваются кислородом, а окружающий его металл остается твердым. Вытесненные струей расплавленные окислы нагревают нижележащий слой металла, обеспечивая условия для его интенсивного окисления и т. д. В результате процесс окисления распространяется на всю толщину заготовки. Расплавленные окислы удаляются струей режущего кислорода из зоны реза. В шлак попадает сравнительно небольшое количество металла. За последнее время достигнуто повышение точности кислород-

ной резки, что значительно расширило область ее применения: ее стали эффективно применять не только в монтажных условиях, но и в заготовительных цехах. Кислородной резке подвергают металлы и сплавы, удовлетворяющие ряду требований:

температура плавления металла должна быть выше температуры воспламенения в струе чистого кислорода, т. е. металл в процессе резки должен сгорать, не образуя на кромках реза наплывы; этому требованию удовлетворяют металлы с низким содержанием углерода; с повышением содержания углерода в стали более 0,7 % способность к резке падает;

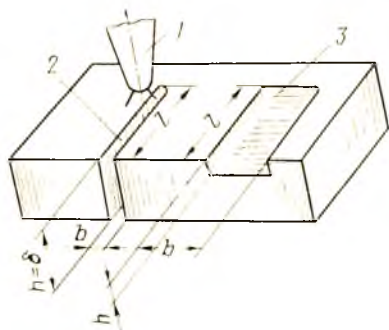


**Рис. 40. СХЕМА ТЕПЛОВОЙ РЕЗКИ МЕТАЛЛА:**  
1 — режак; 2 — разделительный рез; 3 — поверхностный рез

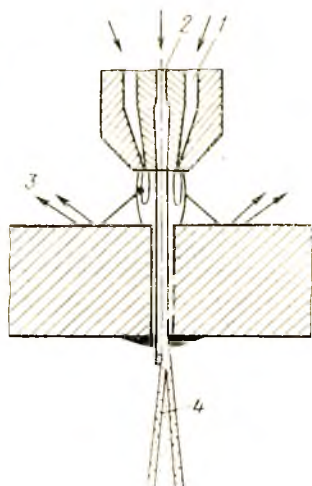


**Рис. 41. СХЕМА КИСЛОРОДНОЙ РЕЗКИ МЕТАЛЛА:**  
1 — горючая смесь; 2 — кислород; 3 — пламя для подогрева; 4 — окислы

температура плавления металла должна быть выше температуры плавления окислов, образующихся в процессе резки; это дает возможность удалить свободно окислы из места реза; однако такие металлы, как алюминий, медь, магний и их сплавы, а также высоколегированные стали этому условию не отвечают, так как при нагреве поверхности образуется пленка тугоплавкого окисла, которая изолирует металл от контакта с кислородом;

появляющиеся при резке шлаки должны быть жидкотекучими, что вытекает из первых двух требований; газовая резка металлов, содержащих высокий процент кремния или хрома, затруднительна или невозможна; наличие в сплавах одних примесей повышает температуру плавления окислов, другие препятствуют воспламенению металла, а третьи изменяют свойства металла в месте реза и приводят к появлению трещин; ухудшают процесс резки стали примеси — молибден при содержании его в сплаве более 0,7 %; хром при содержании более

7—10 % и др.; наличие в стали углерода более 0,4 % создает условия для резки, но приводит к появлению на поверхности реза закалочных структур и даже трещин; для качественной резки необходимо применять предварительный подогрев;

для непрерывного образования оксида металла процесс горения металла в кислороде должен сопровождаться выделением теплоты;

горение железа идет экзотермически по уравнениям:

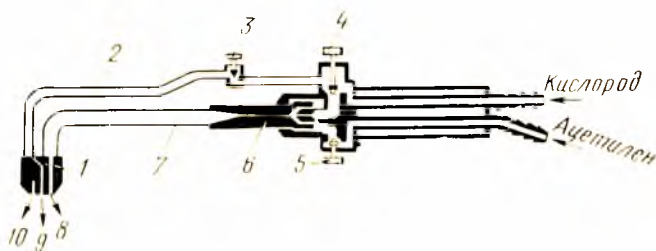
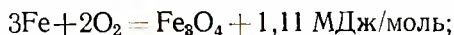
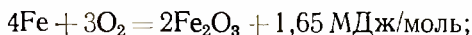


Рис. 42. ИНЖЕКЦИОННЫЙ АЦЕТИЛЕНО-КИСЛОРОДНЫЙ РЕЗАК:

1 — головка; 2 — кислородопровод; 3, 4, 5 — вентили; 6 — инжектор; 7 — смесительная камера; 8, 10 — отверстия для выхода горючей смеси; 9 — отверстие для режущего кислорода

выделяющаяся теплота подогревает нижележащие участки разрезаемого металла, однако вести процесс только за счет подогрева не удастся, так как выходящий шлак уносит с собой теплоту и часть ее отводится в окружающий металл; кроме того, из-за дросселирования режущего кислорода, выходящего из сопла, происходит некоторое охлаждение места реза; главную долю тепла (70—95 %) для подогрева металла все же составляет теплота реакции окисления железа; как показали исследования, тепло, выделяемое подогревательным пламенем, составляет 5—30 % теплоты общего баланса при газовой резке и зависит от толщины разрезаемого металла;

теплопроводность разрезаемого металла должна быть низкой, так как трудно, а иногда невозможно в большой массе высокотеплопроводного металла обеспечить концентрированный нагрев зоны реза; для малоуглеродистой стали, теплопроводность которой невелика, не имеется трудностей как в начальный момент, так и в процессе реза.

Подогрев зоны реза осуществляется ацетилено-кислородным пламенем, но так как роль температуры подогрева не имеет столь большого значения, как при газовой сварке, то

для резки используют различные заменители — пропан-бутан, метан, бензин, керосин и др.

Кислородная резка осуществляется специальными резаками (рис. 42), которые при равномерном перемещении позволяют получить поверхность реза высокого качества. На качество реза оказывают влияние форма структуры струи режущего кислорода и положение ее относительно подогревающего пламени. Наиболее эффективно концентрическое расположение подогревающей и режущей струи, что обеспечивается объединением каналов для смеси и режущего кислорода в одной головке резака, состоящей из внутреннего (для кислорода) и наружного (для смеси горючего газа и кислорода) мундштуков. Диаметр отверстия выходного внутреннего мундштука в зависимости от толщины разрезаемого металла в строительстве трубопроводов и резервуаров колеблется от 0,7 до 2,3 мм (табл. 3).

Таблица 3

РЕЖИМЫ МЕХАНИЗИРОВАННОЙ КИСЛОРОДНОЙ РЕЗКИ

| Показатели                 | Толщина стали, мм |             |      |      |     |
|----------------------------|-------------------|-------------|------|------|-----|
|                            | 5                 | 10          | 20   | 30   | 40  |
| Номер:                     |                   |             |      |      |     |
| наружного мундштука        | 0                 | 1           | 1    | 1    | 1   |
| внутреннего мундштука      | 1                 | 2           | 2    | 2    | 3   |
| Давление:                  |                   |             |      |      |     |
| кислорода, МПа             | 0,18              | 0,2         | 0,65 | 0,55 | 0,7 |
| ацетилена, кПа             |                   | От 10 до 30 |      |      |     |
| Скорость резки, мм/мин     | 550               | 470         | 370  | 330  | 300 |
| Расход, м <sup>3</sup> /ч: |                   |             |      |      |     |
| кислорода                  | 1,2               | 1,8         | 4    | 5,5  | 6,6 |
| ацетилена                  | 0,35              | 0,35        | 0,4  | 0,4  | 0,4 |
| Ширина реза, мм            | 2,5               | 2,5         | 3    | 4    | 4   |

. Качество и производительность кислородной резки зависят от следующих основных факторов: чистоты кислорода, скорости перемещения пламени, расстояния между поверхностью металла и горелкой и др. С понижением чистоты кислорода на 1 % увеличивается продолжительность резки на 10—15 % и удельный расход кислорода на 25—35 %. При этом на поверхности кромок приваривается трудноотделимый шлак, содержащий высокий процент неокисленного железа. Изменение скорости перемещения подогревательного пламени и кислородной струи влияет на глубину прогрева кромок и чистоту поверхности реза. При медленном перемещении сопла поверхность реза оплавляется частично, а при повышенном — получается недостаточно ровной и шлак не успевает полностью удалиться из реза. Изменение расстояния между поверхностью металла и соплом обуславливает изменение ширины реза и нарушение



теплового режима подогрева. Для достижения наиболее концентрированного нагрева расстояние от сопла до поверхности металла при резке стали должно составлять  $L=l+3$ , где  $l$  — длина ядра пламени. При резке стали большой толщины имеется опасность перегрева и засорения мундштука брызгами металла, поэтому расстояние увеличивают  $L=l+(5\div 10)$ . Для ручной кислородной резки стабильность большинства перечисленных факторов сохранить сложно, поэтому качество резки получается невысокое, что приводит к «выхватам», надтекам и получению скола кромок.

Тепловое воздействие резки сопровождается структурными изменениями в металле. Глубина зоны термического влияния при резке малоуглеродистых сталей толщиной 5 мм составляет 0,1—0,3 мм, а толщиной 100 мм — 1,5—2 мм. При резке углеродистой стали с содержанием углерода 0,5—1 % глубина зоны термического влияния для тех же толщины составляет соответственно 0,3—0,5 и 2,5—3,5 мм. Кромки реза обогащаются углеродом даже при низком содержании его в стали, причем в нижней части содержание углерода может достичь 0,3—0,75 % в зависимости от толщины стали, содержащей всего 0,15—0,25 % углерода. При этом металл кромок почти всегда склонен к закалке, которая в зависимости от содержания углерода и легирующих добавок в стали и от скорости охлаждения может сопровождаться закалочными структурами. Как показывают исследования, при резке малоуглеродистых резервуарных сталей закалка не происходит, но имеет место перекристаллизация, а в зоне с нагревом 1000—1100 °С отмечается увеличение роста зерна и повышение твердости на 2—8 %.

*Дуговая резка* выполняется стальным электродом с повышенной толщиной покрытия или проволокой под флюсом и заключается в расплавлении металла теплом электрической дуги. Электрическая дуговая резка стальным покрытым электродом применяется для грубой резки металла. Электрическую дугу зажигают на верхней кромке металла, а затем перемещают ее вниз по торцу листа. Капли расплавленного металла удаляют из полосы реза козырьком покрытия электрода. Резку ведут на постоянном или переменном токе, используя стандартное сварочное оборудование для дуговой сварки. Лучшее качество и более высокая производительность достигаются при автоматической дуговой резке под флюсом. Так, нержавеющей сталь толщиной 20 мм можно разрезать со скоростью  $8,3 \cdot 10^{-3}$  м/с, используя проволоку Св-08 диаметром 4 мм и флюс АН-348А (напряжение 42—44 В, ток 1200 А).

В процессе *воздушно-дуговой резки* металл расплавляется теплом электрической дуги, горящей между неплавящимся электродом (угольным или графитизированным) и обрабатываемым металлом, при непрерывном удалении жидкого расплава струей сжатого воздуха (рис. 43). Способ применяется

для резки углеродистых и высоколегированных сталей, цветных металлов, алюминия, чугуна и трудноокисляемых сплавов толщиной 5—25 мм, а также для удаления дефектных участков швов, прихваток, создания отверстий и др. Воздушно-дуговая резка выполняется на токе 300—1500 А с давлением воздуха 0,6—0,8 МПа. В качестве электродов используют омедненные угли диаметром 6—12 мм, длиной 300 мм. Для резки углеродистых и легированных сталей применяют преимущественно постоянный ток обратной полярности, для резки цветных металлов — постоянный ток прямой полярности или переменный

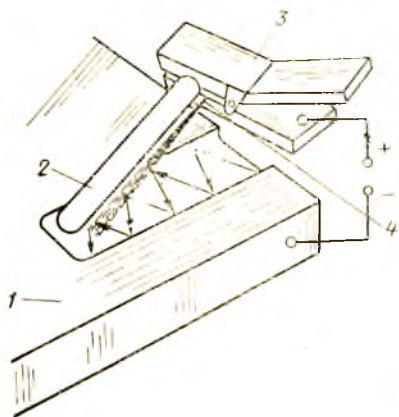


Рис. 43. СХЕМА ВОЗДУШНО-ДУГОВОЙ РЕЗКИ:

1 — основной металл; 2 — электрод; 3 — держатель; 4 — газовое сопло

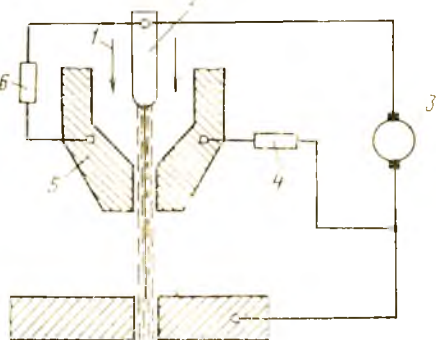


Рис. 44. СХЕМА ПЛАЗМЕННО-ДУГОВОЙ РЕЗКИ С ВЫСОКОЧАСТОТНЫМ ВОЗБУЖДЕНИЕМ ДУГИ

ток. Резку ведут ручным или механизированным способом. Недостатки этого способа — науглероживание стенок разрезаемого металла и необходимость применения повышенного напряжения холостого хода у источника тока.

*Кислородно-дуговая резка* имеет много общего с предыдущей, только для процесса применяют трубчатые стальные и тугоплавкие неметаллические электроды, а также стальные покрытые электроды. Продукты сгорания от электрической дуги удаляют из зоны реза струей кислорода. Пуск кислорода осуществляют рычажным устройством кислородного клапана, который расположен на рукоятке резака. Для резки применяют электроды ЦМ-7, ОММ-5 и др. Резку проводят на постоянном или переменном токе.

При *плазменно-дуговой резке* (рис. 44) электрическая дуга горит между изделем и электродом 2 (вольфрамовый диаметром 3—8 мм, циркониевый и т. д.). В отличие от дуговой сварки или резки здесь разряд стабилизирован каким-либо га-

зовым потоком  $I$  аргона, гелия, технического азота, водорода или их смесей, а также воздуха. Стабилизирующий газ проходит через столб разряда, образуя плазму. Поток низкотемпературной плазмы представляет собой узкий концентрированный столб из заряженных частиц. Концентрация теплоты обеспечивается за счет обжигания столба дуги под действием струи стабилизирующего газа. Так как электрод расположен внутри мундштука 5 (сопло с воздушным или водяным охлаждением) резака, то возбуждение дуги осуществляется осциллятором 6. Процесс резки начинается с возбуждения малоамперной дуги (ток от генератора 3 подается через балластное сопротивление 4 для регулирования тока 15 А вспомогательной дуги) между электродом и мундштуком. Образовавшийся факел плазмы, выдуваемый струей газа из мундштука, способствует ионизации пространства между электродом и изделием, обеспечивая возникновение режущей дуги. Скорость плазменно-дуговой резки намного превышает скорость газокислородной резки. Если скорость газокислородной резки малоуглеродистой стали толщиной 20 мм составляет около 20 м/ч, то плазменно-дуговой — 120 м/ч. Скорость плазменно-дуговой резки  $\omega$  определяется тепловым потоком, приходящимся на единицу поверхности плавления, и выражается формулой

$$\omega = \frac{(IU\eta - q_m) \rho}{\delta b (c_{пл} T_{пл} - c_0 T_0 + a)},$$

где  $I$  — ток;  $U$  — напряжение дуги;  $\eta$  — эффективный к. п. д. нагрева металла электрической дугой;  $q_m$  — количество теплоты, отводимое в массу металла;  $\rho$  — плотность металла;  $\delta$  — толщина разрезаемого металла;  $b$  — ширина реза;  $T_{пл}$ ,  $T_0$  — температуры плавления и холодного металла;  $c_{пл}$ ,  $c_0$  — теплоемкости металла при этих температурах;  $a$  — теплота плавления металла.

Скорость плазменно-дуговой резки тем больше, чем больше мощность режущей дуги. Скорость в большей степени зависит от толщины разрезаемого металла, и она тем меньше, чем больше толщина. При ручной плазменно-дуговой резке используют напряжение на дуге 75—120 В (для стабилизирующих газов: аргона, азота, гелия) и ток 220—400 А. При механизированной резке с применением стабилизирующего газа в виде воздуха ток повышают до 700 А и более, а напряжение дуги — до 220 В.

Кроме сварки и резки в монтажных условиях газовое пламя применяют для правки металлоконструкций, термообработки и очистки поверхностей. При правке деформированных изделий стержневой формы (арматура железобетонных конструкций, балки, полосы и т. п.) с помощью газового пламени осуществляют поверхностный нагрев полосами или пятнами до температуры 400—800 °С в зависимости от толщины конструкции.

В нагреваемой зоне происходят пластические деформации сжатия, приводящие после охлаждения к укорочению места нагрева и возникновению в них растягивающих напряжений, которые при правильном выборе расположения зон нагрева приводят к уменьшению прогиба. Правку местных неровностей (хлопунов) на листовых конструкциях проводят путем быстрого концентрированного нагрева пятен или полос, иногда с последующим охлаждением их струей воды, а также ударами по поверхности хлопуна. Местная термообработка с помощью газового пламени применяется в тех случаях, когда невозможно поместить изделие в печь для общей термообработки. В ряде зарубежных стран применяют термическую обработку корпуса сферического резервуара. Для проведения отжига весь корпус временно покрывают теплоизоляцией. Нагрев оболочки осуществляется до температуры 600 °С за счет горения жидкого или газообразного топлива. Термическая обработка оболочки при температуре 600—650 °С является эффективным методом снижения остаточных деформаций.

Принцип местного поверхностного нагрева при температуре 250—300 °С применяют при газопламенной очистке. При быстром нагреве имеющиеся поверхностные пленки на металле, например: окалина, изоляционное покрытие, старая краска — расширяются, откалываются, частично сгорают. Откалывание происходит из-за разницы в коэффициентах линейного расширения пленки и обрабатываемого металла. При удачно подобранной мощности горелки и скорости ее перемещения происходит полная очистка поверхности. Перед окраской ее протирают от пыли.

## ОБОРУДОВАНИЕ И ТЕХНОЛОГИЯ ТЕПЛОВОЙ РЕЗКИ

При сооружении магистральных трубопроводов и резервуаров почти все подготовительные работы выполняют с применением газовой резки. Для газовой резки и обработки металлов применяют следующую аппаратуру.

*Баллоны для сжатых газов.* Газообразный кислород хранят и транспортируют в стальных баллонах под давлением 15 МПа вместимостью 40 л. Для ацетилена и других газов с давлением до 10 МПа используют баллоны вместимостью 5,5 м<sup>3</sup>. Баллоны для пропан-бутана изготавливают сварными из спокойной или полуспокойной стали вместимостью 2,5—80 л. Баллоны окрашивают в цвет, условно присвоенный данному газу; для кислорода — голубой, для ацетилена — белый, для углекислого газа и воздуха — черный, для прочих горючих газов — красный.

*Газовые редукторы.* Редукторы используют для понижения давления газа, отбираемого из баллона или питающей сети, а также для автоматического поддержания рабочего давления постоянным. В монтажных условиях применяют редукторы для

кислородных баллонов ДКП-1-65, ДКМ-1-70, ДКД-8-65, ДКД-15-65, для ацетиленовых баллонов ДАП-1-65, ДАМ-1-70, ДАД-1-65, для баллонов пропан-бутана ДПП-1-65.

**Рукава (шланги).** Рукава применяются для подвода газа к горелке или резаку. Их изготавливают из вулканизированной резины с тканевыми прокладками и применяют для работы при температуре от 50 до  $-35^{\circ}\text{C}$ . В зависимости от среды, подаваемой в рукава, наружный слой имеет различный цвет: для кислорода — синий, для ацетилена и пропан-бутана — красный, для керосина и бензина — желтый.

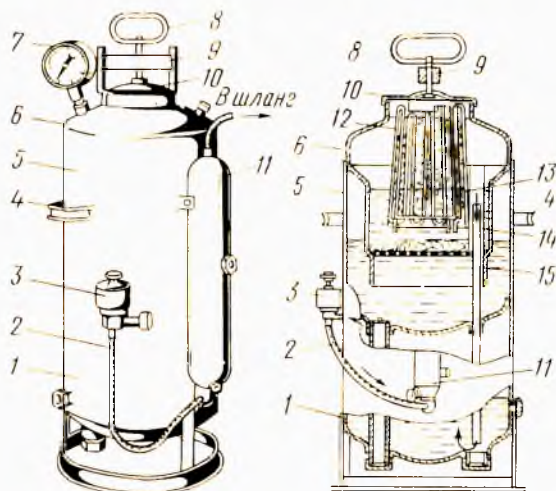


Рис. 45. АЦЕТИЛЕНОВЫЙ ГЕНЕРАТОР СИСТЕМЫ «ВЫТЕСНЕНИЯ ВОДЫ» АСМ-1, 25-3

**Ацетиленовые генераторы.** Ацетиленовые генераторы могут быть стационарными и переносными с различной производительностью ( $3\text{--}100\text{ м}^3/\text{ч}$ ). По принципу взаимодействия карбида кальция с водой имеются системы генераторов: КВ — «карбид на воду», ВК — «вода на карбид», ВВ — «вытеснения воды», комбинированные и др. В монтажных условиях применяют переносные генераторы ГВР-1,25М, АНВ-1,25-72, АСМ-1,25-3 и АСВ-1,25-4. Генератор системы «вытеснения воды» АСМ-1,25-3 (рис. 45) состоит из двух состыкованных частей: промывателя 1 и газообразователя 5. Верхнее днище 6 имеет горловину, через которую устанавливают корзину 12 с карбидом кальция, закрепляемую на крышке 10 винтом 8 и рычагом 9. Пространство между корпусом газообразователя и шахтой 13 образует подушку, обеспечивающую колебание уровня воды при изменении давления ацетилена. Стакан 14, надетый на трубку 15 для отвода ацетилена из газообразова-



теля, предохраняет попадание в промыватель пены и известкового ила. Нижний конец трубки 15 опущен в промыватель 1. Воду для работы генератора заливают через горловину шахты. При опускании корзины 12 с карбидом кальция в воду, заполняющую шахту, с последующим закрытием крышки 10 образующийся ацетилен проходит по трубке 15 в промыватель через слой воды, охлаждаясь при этом, попадает в клапан 3, шланг 2 и водяной затвор 11, а затем в горелку или резак. Генератор имеет манометр 7 и ручки 4. Система «вытеснения воды» находит применение преимущественно в передвижных аппаратах низкого и среднего давлений производительностью не больше 5 м<sup>3</sup>/ч. При работе в зимнее время генератор утепляют чехлом, предохраняющим воду от замерзания.

Генераторы разделяют на две группы: низкого (до 0,01 МПа) и среднего (0,01—0,15 МПа) давлений.

*Газовые резаки.* Для кислородной резки в основном применяют резаки инжекторного типа, которые выпускают в комплекте со сварочными горелками: РГС-70, РАТ-70, РАО-70 к горелкам «Звезда» и ГС-3, резак РГМ-70 к горелкам «Звездочка» и ГС-2. Для удаления корня шва или дефектов сварного соединения применяют резаки РАП-62, РПА-62 и РПК-62, которые имеют дополнительные отверстия для выхода струи режущего кислорода.

*Установки для газовой резки.* На строительных площадках используют переносные и передвижные установки и аппараты, имеющие ручные резаки, регулирующую аппаратуру и баллоны с газом. При монтажных и аварийных работах применяют установки ПГУ-3 и ПУРС, которые укомплектованы редуктором ДКП-1-65, горелкой ГЗМ-62М, вставным резаком РГМП-1-67 и регулятором давления «Балтика». Для механизированной кислородной резки применяют переносные машины «Радуга»; «Спутник-2», «Орбита-2». Установку «Радуга» используют для прямолинейной резки листов толщиной 5—100 мм и вырезки фланцев. Установки «Спутник-2» и «Орбита-2» применяют в трассовых условиях для газовой резки труб с толщиной стенки 5—75 мм, диаметром 168—1420 мм.

*Оборудование для плазменно-дуговой резки.* В комплект оборудования для плазменно-дуговой резки входит режущий плазмотрон (резак), блок управления, источник питания дуги электрическим током, механизм для перемещения плазмотрона вдоль линии реза. Для ручной плазменно-дуговой резки труб с применением воздуха используют установку «Киев-4». Толщина разрезаемого металла 6—50 мм, потребляемая мощность 54 кВт·А, напряжение холостого хода 180 В, расход воздуха при давлении 0,6 МПа 2—3 м<sup>3</sup>/ч, скорость резки 0,5—3 м/мин (в зависимости от толщины стенки трубы).

*Технология тепловой резки.* Процесс прямолинейной кислородной резки начинают с нагрева торца пластины до темпера-

туры воспламенения в кислороде, а практически до плавления. Далее подают кислородную струю, обеспечивая непрерывное окисление металла по толщине изделия, перемещая резак по линии реза. При резке стали толщиной до 30 мм мундштук резака вначале устанавливают вертикально или с наклоном 5—10° в сторону, обратную направлению резки. Далее этот угол увеличивают до 30°, обеспечивая частично или полностью удаление с передней грани разреза жидких шлаков, ускоряя окисление металла и повышая производительность. Резка стали большой толщины (до 100 мм) требует, чтобы мундштук резака в начале процесса был установлен под углом 10—15°. Если резка осуществляется внутри контура листа или заготовки, то в начале процесса для стока шлака необходимо отверстие, которое при толщине стали до 20 мм прожигают резак при горизонтальном положении листа. При большей толщине стали (до 40 мм) лист необходимо устанавливать в вертикальное или наклонное положение. В монтажных условиях отверстие внутри контура обеспечивают движущимся резак. Кислородная струя, врезаясь постепенно в металл, пробивает сквозное отверстие. Этот способ начала резки применяют в резервуаростроении при вырезке отверстий под штуцеры и патрубки. Шлаки, образующиеся при прожигании отверстия перемещаемым резак, давлением кислородной струи выносятся назад, что предотвращает засорение мундштука брызгами металла и шлака. Начальное отверстие в заготовке толщиной 100—150 мм обеспечивают механическим высверливанием или прожиганием кислородным копьём. При вырезке отверстий вручную или механизированным способом в заготовке любой толщины режущее сопло располагают перпендикулярно к поверхности металла.

Скорость перемещения резака является основным параметром режима, определяющего качество кромок и производительность процесса. От скорости резки в большей мере зависит степень прорезания металла по толщине. Скорость кислородной резки можно определить по формуле  $\omega = 16,6/1000\tau$ , где  $\tau = 1,25 \div 0,025 \delta$  — продолжительность резки 1 м длины реза;  $\delta$  — толщина разрезаемой стали.

Кислородная резка металла в монтажных условиях является одним из основных технологических процессов при подготовительных операциях. Экономическая эффективность применения кислородной резки зависит от толщины изделий. Для листов толщиной 5 мм и более трудоемкость и скорость кислородной резки меньше, чем резки на гильотинных ножницах. С увеличением толщины эффективность применения кислородной резки по сравнению с механической возрастает еще больше.

## Глава 6

### МАТЕРИАЛЫ, ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ПРИ СООРУЖЕНИИ ТРУБОПРОВОДОВ И РЕЗЕРВУАРОВ

#### ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К МАТЕРИАЛАМ ТРУБОПРОВОДОВ И РЕЗЕРВУАРОВ

Для сооружения городских, промышленных и магистральных трубопроводов, работающих при давлении до 10 МПа, выбирают трубы в соответствии со строительными нормами и правилами. Для строительства трубопроводов применяют трубы: стальные бесшовные (ГОСТ 8731—74 и ГОСТ 8733—74), электросварочные (ГОСТ 20295—74) диаметром до 800 мм включительно; электросварочные (прямошовные и спиральношовные) диаметром 800 мм и более, поставляемые по техническим условиям (ТУ).

Бесшовные горячекатаные трубы в зависимости от назначения и показателей качества поставляются по группам А, Б, В, Г и Д. Магистральные трубопроводы сооружают преимущественно из стальных труб группы В. Электросварочные трубы изготавливают из спокойной и полуспокойной углеродистой или низколегированной стали, поставляемой в горячекатаном или термически обработанном состоянии. Трубы с продольным сварным швом изготавливают из нормализованного листа. Для исходного металла допускается плюсовое отклонение по химическому составу в соответствии с требованиями ГОСТ 19281—73, ГОСТ 19282—73 и ГОСТ 1050—74.

Для лучшей свариваемости металла труб эквивалент углерода  $C_{\text{э}}$  каждой плавки не должен превышать 0,46 %

$$C_{\text{э}} = C + Mn/6 + (V + Cr)/5,$$

где  $C$ ,  $Mn$ ,  $V$  и  $Cr$  — процентное содержание в стали соответственно углерода, марганца, ванадия и хрома.

Ударная вязкость основного металла труб низколегированной стали при температуре испытаний  $-40^\circ\text{C}$  должна быть не менее 0,3 МДж/м<sup>2</sup> для термически не обработанных сталей и 0,4 МДж/м<sup>2</sup> для термически обработанных.

Трубы, поставляемые по техническим условиям, изготавливают из сталей, удовлетворяющих следующим требованиям:

отношение предела текучести к временному сопротивлению металла должно быть не менее 0,75 для труб из углеродистых сталей, 0,8 для труб из низколегированных сталей и не более 0,85 для труб из дисперсионно-твердеющих или термически упрочненных сталей;

относительное удлинение испытываемых образцов должно быть не менее 20 % для труб из углеродистых и низколегиро-

ванных сталей с временным сопротивлением до 600 МПа включительно, не менее 18 % для труб из дисперсионно-твердеющих сталей с временным сопротивлением более 600 МПа и не менее 16 % для термически упрочненных труб с временным сопротивлением 600 МПа и более;

ударная вязкость основного металла и сварных соединений труб должна удовлетворять требованиям СНиП II-45—75;

эквивалент углерода для определения свариваемости стали находят по формуле МИС

$$C_{\text{э}} = C + \text{Mn}/6 + (\text{V} + \text{Mo} + \text{Cr})/5 + (\text{Cu} + \text{Ni})/15,$$

где С, Мп, V, Мо, Сг, Сu, Ni — процентное содержание в металле труб соответственно углерода, марганца, ванадия, молибдена, хрома, меди и никеля ( $C_{\text{э}}$  не должен превышать 0,46 %). Бесшовные трубы изготовляют с фаской под углом 35—40° и притуплением 1—3 мм. Кривизна труб допускается не более 1,5 мм на 1 м длины трубы. Общая кривизна не должна превышать 0,2 % от длины трубы. Длина труб 10—12 м. Допускается поставка горячеправленных труб длиной 5—6 м, а также поставка 10 % (от партии) прямошовных и спиральношовных труб длиной не менее 8 м и 5 % горячеправленных труб длиной не менее 4 м. Концы труб должны иметь фаску под углом 25—30° (при толщине стенки до 10 мм включительно) и 30—35° (при большей толщине стенки). Для спиральношовных труб ширина торцового кольца в зоне шва не должна превышать 5 мм. На других участках периметра притупление торца труб должно составлять 1—3 мм. Для электросварных труб диаметром более 800 мм, поставляемых по техническим условиям, отклонения от номинальных размеров наружных диаметров могут быть  $\pm 2$  мм. Овальность концов труб не должна превышать 1 %. Кривизна труб должна составлять не более 1,5 мм на 1 м длины. Длина спиральношовных труб принимается равной 12 м. Длина труб с продольным швом должна быть не менее 10,5 м. Допускается поставка не более 10 % от каждой партии труб длиной не менее 9 м. Концы труб должны иметь разделку.

Исходя из условий эксплуатации резервуарных конструкций, материалы для изготовления их должны обладать комплексом свойств. Основными из них являются высокая прочность при достаточно высокой пластичности и вязкости стали, минимальная склонность к хрупкому разрушению, хладноломкости и старению, низкая чувствительность к надрезам. Материал должен хорошо свариваться, обеспечивая полную герметичность резервуара во избежание утечек хранимых продуктов.

Материал должен иметь достаточную коррозионную стойкость в условиях атмосферы и воздействия хранимых в резервуарах продуктов. Кроме того, материал должен быть недефицитным и выпускаться массовым производством. Поэтому для

резервуаров применяется сталь, хорошо раскисленная, с низким содержанием углерода, достаточно чистая по содержанию серы, фосфора, с минимальным количеством кислорода, азота, водорода, с однородным распределением и небольшим количеством неметаллических включений, мелкозернистая, несклонная к старению, с низким порогом хладноломкости (не выше  $-40^{\circ}\text{C}$ ).

### СТАЛИ ДЛЯ ТРУБОПРОВОДОВ И РЕЗЕРВУАРОВ

Стали, применяемые для трубопроводов, делятся на два вида — углеродистые и низколегированные, поставляемые в состоянии проката, и углеродистые и низколегированные, поставляемые после термической обработки. Бесшовные горячекатаные и электросварные трубы небольших диаметров (до 530 мм) изготовляют в основном из углеродистых сталей обыкновенного качества и углеродистых конструкционных качественных. Возможно также применение и низколегированных сталей. Химический состав (в %) и механические свойства этих сталей должны удовлетворять ГОСТ 20295—74:

| Элементы                | C    | Mn   | Si   | S     | P     | Cr   | Ni  | Cu  | V   |
|-------------------------|------|------|------|-------|-------|------|-----|-----|-----|
| Углеродистая сталь      | 0,22 | 0,65 | 0,37 | 0,04  | 0,035 | 0,25 | 0,3 | 0,3 | —   |
| Низколегированная сталь | 0,2  | 1,65 | 0,6  | 0,035 | 0,035 | 0,8  | 0,3 | 0,3 | 0,1 |

| Класс прочности | $\sigma_B$ , МПа | $\sigma_T$ , МПа | $\delta_5$ , % |
|-----------------|------------------|------------------|----------------|
| K34             | 340              | 210              | 24             |
| K38             | 380              | 240              | 22             |
| K42             | 420              | 250              | 21             |
| K50             | 500              | 350              | 20             |
| K52             | 520              | 360              | 20             |
| K55             | 550              | 380              | 20             |

Примечание.  $\sigma_B$ —предел прочности;  $\sigma_T$ —предел текучести;  $\delta_5$ —относительное удлинение.

### МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛА ТРУБ

Таблица 4

| Показатели       | 17Г1С, 14ХГС, 17ГС | 15ГСТЮ | 14Г2АФ | 14Г2АФ (после горячей плавки) | 16Г2САФ | 17Г2АФ | Страна — поставщик |        |                                 |        |        |
|------------------|--------------------|--------|--------|-------------------------------|---------|--------|--------------------|--------|---------------------------------|--------|--------|
|                  |                    |        |        |                               |         |        | Италия             | Италия | Франция                         | Япония | Япония |
| $\sigma_B$ , МПа | 500                | 530    | 550    | 570                           | 600     | 600    | 540                | 600    | 600                             | 600    | 540    |
| $\sigma_T$ , МПа | 350                | 360    | 380    | 400                           | 420     | 420    | 400                | 470    | 450<br>$C \leq 0,13\%$<br>(420) | 470    | 400    |
| $\delta_5$ , %   | 20                 | 20     | 20     | 19                            | 19      | 19     | 20                 | 20     | $C \leq 0,19\%$<br>20           | 20     | 20     |



Таблица 5

## ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ МЕТАЛЛА ТРУБ (В %)

| C | Mn | Si | V | Nb | Ti | V + Nb + Ti |
|---|----|----|---|----|----|-------------|
|---|----|----|---|----|----|-------------|

## Трубы отечественного производства

|           |           |         |           |   |           |   |
|-----------|-----------|---------|-----------|---|-----------|---|
| 0,15—0,2  | 1—1,4     | 0,4—0,6 | —         | — | —         | — |
| 0,11—0,16 | 1—1,3     | 0,4—0,6 | —         | — | —         | — |
| 0,15—0,2  | 1,15—1,55 | 0,4—0,6 | —         | — | —         | — |
| 0,15—0,2  | 1,2—1,6   | 0,4—0,6 | 0,08      | — | —         | — |
| 0,13—0,18 | 1,2—1,6   | 0,5—0,8 | —         | — | 0,09—0,15 | — |
| 0,15—0,2  | 1,3—1,6   | 0,3—0,5 | 0,08—0,12 | — | —         | — |
| 0,2       | 1,3—1,6   | 0,3—0,5 | 0,08—0,12 | — | —         | — |

## Трубы импортной поставки

|      |      |          |      |      |   |      |
|------|------|----------|------|------|---|------|
| 0,15 | 1,6  | 0,2—0,5  | 0,08 | 0,05 | — | —    |
| 0,15 | 1,6  | 0,2—0,5  | 0,08 | 0,05 | — | —    |
| 0,12 | 1,65 | 0,5      | 0,08 | 0,06 | — | —    |
| 0,13 | 1,65 | 0,5      | 0,08 | 0,06 | — | —    |
| 0,19 | 1,65 | 0,5      | 0,1  | —    | — | 0,14 |
| 0,12 | 1,65 | 0,2—0,5  | 0,08 | 0,05 | — | 0,16 |
| 0,12 | 1,65 | 0,2—0,35 | 0,04 | 0,05 | — | 0,16 |
| 0,12 | 1,65 | 0,2—0,4  | 0,08 | 0,05 | — | —    |

| Al | N | S | P | Cr | Ni | Cu | Mo |
|----|---|---|---|----|----|----|----|
|----|---|---|---|----|----|----|----|

## Трубы отечественного производства

|           |             |       |       |         |     |     |   |
|-----------|-------------|-------|-------|---------|-----|-----|---|
| —         | —           | 0,04  | 0,035 | 0,3     | 0,3 | 0,3 | — |
| —         | —           | 0,04  | 0,035 | 0,5—0,8 | 0,3 | 0,3 | — |
| —         | —           | 0,03  | 0,035 | 0,3     | 0,3 | 0,3 | — |
| —         | —           | 0,03  | 0,035 | 0,3     | 0,3 | 0,3 | — |
| 0,01—0,15 | —           | 0,04  | 0,04  | —       | —   | —   | — |
| —         | 0,015—0,030 | 0,035 | 0,035 | 0,3     | 0,3 | 0,3 | — |
| —         | 0,025       | 0,02  | 0,035 | —       | —   | —   | — |

## Трубы импортной поставки

|   |   |       |       |      |      |   |      |
|---|---|-------|-------|------|------|---|------|
| — | — | 0,015 | 0,025 | 0,25 | 0,1  | — | —    |
| — | — | 0,012 | 0,025 | 0,25 | 0,1  | — | —    |
| — | — | 0,15  | 0,2   | —    | —    | — | 0,3  |
| — | — | 0,015 | 0,03  | —    | —    | — | —    |
| — | — | 0,025 | 0,03  | —    | —    | — | —    |
| — | — | 0,01  | 0,02  | —    | 0,25 | — | 0,25 |
| — | — | 0,01  | 0,018 | —    | 0,3  | — | 0,2  |
| — | — | 0,01  | 0,025 | —    | 0,3  | — | 0,3  |

При увеличении диаметров и уменьшении толщины стенок металл труб должен обладать значительным пределом текучести (не менее 350 МПа) и временным сопротивлением (свыше 500 МПа). Поэтому сварные тонкостенные трубы диаметром 500 мм и больше изготавливаются из низколегированных и высокопрочных строительных сталей, обладающих большой прочностью при достаточно высоких пластичности и вязкости. Наиболее широко для труб применяют стали, механические свойства которых приведены в табл. 4, 5.

Для сооружения резервуаров применяют стали обычной прочности (класс С38/23 — малоуглеродистые), а также стали повышенной прочности и высокопрочные (классы С46/33, С52/40 и С60/45 — низколегированные стали). Для основных (несущих) конструкций резервуаров (корпус, днище, кровля) применяют малоуглеродистые спокойные стали группы В (ГОСТ 380—71), из которых наиболее распространенной является сталь ВСтЗсп5. В настоящее время для резервуаров все большее распространение получают полуспокойные стали ВСтЗпс5 (ГОСТ 380—71) и В18Гпс. В районах с минимальными зимними температурами до  $-40^{\circ}\text{C}$  для резервуаров применяют малоуглеродистые стали марки ВСтЗсп с дополнительным раскислением алюминием или титаном. При сооружении резервуаров вместимостью 10 тыс.  $\text{м}^3$  и более, а также для нижних поясов резервуаров вместимостью 5—10 тыс.  $\text{м}^3$ , предназначенных для районов с низкой расчетной температурой (до  $-40^{\circ}\text{C}$ ), применяют низколегированную сталь 09Г2С. Для резервуаров большой вместимости (3—10 тыс.  $\text{м}^3$ ) применяют высокопрочные низколегированные стали, из которых наиболее распространена сталь марки 16Г2АФ (класса С60/45). Применение этой стали позволяет снизить толщину стенки.

Сталь для резервуаров поступает с металлургических заводов в виде листов стандартных размеров  $6000 \times 1500$  мм при толщине не менее 4 мм и  $2500 \times 1250$  мм при толщине 2,5 мм (для покрытия). Кроме того, сталь поставляют в виде проката различного профиля (уголок, швеллер, двутавр). За рубежом при сооружении резервуаров с малоуглеродистыми и низколегированными сталями для резервуаров большой вместимости (до 100 тыс.  $\text{м}^3$ ) широко применяют высокопрочные низколегированные термоупрочненные стали.

## **МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ВЫПОЛНЕНИЯ СВАРОЧНЫХ РАБОТ**

### **Электроды для ручной электродуговой сварки**

Электроды для ручной дуговой сварки в стандартах классифицируются по назначению (для сварки стали, алюминия, чугуна и т. п.), толщине и типу покрытия, механическим свойствам металла шва (табл. 6), способу нанесения покрытия

## ЭЛЕКТРОДЫ ДЛЯ РУЧНОЙ ДУГОВОЙ СВАРКИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТАЛЕЙ

| Тип  | Металл шва или наплавленный металл |               |                            | Сварное соединение, выполненное электродами диаметром менее 3 мм |                     |
|------|------------------------------------|---------------|----------------------------|------------------------------------------------------------------|---------------------|
|      | $\sigma_B$ , МПа                   | $\delta$ , мм | $a_H$ , МДж/м <sup>2</sup> | $\sigma_B$ , МПа                                                 | Угол загиба, градус |
|      | Не менее                           |               |                            |                                                                  |                     |
| Э38  | 380                                | 14            | 0,3                        | 380                                                              | 60                  |
| Э42  | 380                                | 18            | 0,8                        | 420                                                              | 150                 |
| Э46  | 460                                | 18            | 0,8                        | 460                                                              | 150                 |
| Э50  | 500                                | 16            | 0,7                        | 500                                                              | 120                 |
| Э42А | 420                                | 22            | 1,5                        | 420                                                              | 180                 |
| Э46А | 460                                | 22            | 1,4                        | 460                                                              | 180                 |
| Э50А | 500                                | 20            | 1,3                        | 500                                                              | 150                 |
| Э55  | 550                                | 20            | 1,2                        | 550                                                              | 150                 |
| Э60  | 600                                | 18            | 1                          | 600                                                              | 120                 |
| Э70  | 700                                | 14            | 0,6                        | —                                                                | —                   |
| Э85  | 850                                | 12            | 0,5                        | —                                                                | —                   |
| Э100 | 1000                               | 10            | 0,5                        | —                                                                | —                   |
| Э125 | 1250                               | 8             | 0,4                        | —                                                                | —                   |
| Э150 | 1500                               | 6             | 0,4                        | —                                                                | —                   |

(опрессовкой или окунанием) и др. Electroды покрытые металлические для сварки и наплавки сталей по ГОСТ 9466—75 в зависимости от назначения разделены на классы: для сварки углеродистых и низколегированных конструкционных сталей с  $\sigma_B < 600$  МПа — У (условное обозначение); для сварки легированных конструкционных сталей с  $\sigma_B > 600$  МПа — Л; для сварки теплоустойчивых сталей — Т; для сварки высоколегированных сталей с особыми свойствами — В; для наплавки поверхностных слоев с особыми свойствами — Н. В этом стандарте в зависимости от отношения полного диаметра электрода  $D$  к диаметру стержня  $d$ , т. е. толщины покрытия, электроды разделяются: с тонким покрытием ( $D/d \leq 1,2$ ) присвоен индекс М; со средним покрытием ( $1,2 < D/d < 1,45$ ) — С; с толстым покрытием ( $1,45 < D/d \leq 1,8$ ) — Д; с особо толстым покрытием ( $D/d > 1,8$ ) — Г. По качеству изготовления, состоянию поверхности покрытия, сплошности металла шва, содержанию серы и фосфора в наплавленном металле электроды подразделяются на группы 1, 2 и 3. По видам покрытий электроды подразделяются: с кислым — индекс А; с основным — Б; с целлюлозным — Ц; с рутиловым — Р; с покрытием смешанного вида — соответствующее двойное условное обозначение; с прочими видами покрытий — индекс П. Если покрытие имеет железный порошок более 20 %, то в обозначении добавляют еще букву Ж. В зависимости от пространственного положения сварки или на-

плавки электроды подразделяют: для всех положений — индекс 1; для всех положений, кроме вертикального сверху вниз, — 2; для нижнего, горизонтального на вертикальной плоскости и вертикального снизу вверх — 3; для нижнего и нижнего в лодочку — 4.

По роду и полярности используемого при сварке или наплавке тока, а также номинальному напряжению холостого тока, применяемого источника питания сварочной дуги переменного тока частотой 50 Гц электроды подразделяются на виды с индексами от 0 до 9.

Во всех видах технической документации условное обозначение электродов состоит из марки, диаметра, группы электродов и обозначения стандарта ГОСТ 9466—75. Классификацию рассмотрим на примере электродов Э46А (ГОСТ 9467—75), марки УОНИ-13/45 диаметром 3 мм, используемых для сварки углеродистых и низколегированных сталей У, с толстым покрытием Д, принадлежащих ко второй группе ГОСТ 9467—75, имеющих характеристики наплавленного металла и металла шва, с основным покрытием Б, для сварки во всех пространственных положениях 1, на постоянном токе обратной полярности 0. Полное обозначение имеет следующий вид:

Э46А — УОНИ-13/45 — 3,0 — УД2 — ГОСТ 9466—75, ГОСТ 9467—75,  
Е — 432 (5) — Б10

а в технических документах указывают: электроды УОНИ-13/45-3,0—2 — ГОСТ 9466—75. В знаменателе полного обозначения электродов сущность букв и цифр характеризует свойства наплавленного металла по ГОСТ 9467—75, где регламентировано 14 типов электродов для сварки конструкционных сталей и 9 типов сварки теплоустойчивых сталей. Для сварки конструкционных сталей тип электрода (Э42, Э42А, Э50 и др.) указывает цифрами временное сопротивление при разрыве, а буква А характеризует более высокие характеристики пластичности наплавленного металла. В условном обозначении электродов в знаменателе группу индексов, указывающих характеристики наплавленного металла, записывают следующим образом: первые два индекса указывают минимальное значение  $\sigma_b$ , а третий индекс одновременно условно характеризует минимальные значения  $\delta_5$  и температуры  $T_x$ , при которой определяется ударная вязкость. Таким образом, третья цифра обозначает: 0 —  $\delta_5 < 20$  и  $T_x$  не регламентированы; 1 —  $\delta_5 = 20$  и  $T_x = 20^\circ\text{C}$ ; 2 —  $\delta_5 = 22$  и  $T_x = 0^\circ\text{C}$ ; 3 —  $\delta_5 = 24$  и  $T_x = -20^\circ\text{C}$ ; 4 —  $\delta_5 = 24$  и  $T_x = -30^\circ\text{C}$ ; 5 —  $\delta_5 = 24$  и  $T_x = -40^\circ\text{C}$ ; 6 —  $\delta_5 = 24$  и  $T_x = -50^\circ\text{C}$ ; 7 —  $\delta_5 = 24$  и  $T_x = -60^\circ\text{C}$ . Если значения  $\delta_5$  и  $T_x$  различны, то третий индекс соответствует минимальной величине  $\delta_5$ , а для  $T_x$  вводится дополнительно, в скобках, четвертый индекс, характеризующий  $T_x$ .



## Электроды с кислым покрытием вида А

Шлакообразующую основу покрытия электродов (ОММ-5, СМ-5, ЦМ-7 и др.) составляют железные и марганцевые руды и кремнезем. Газовая защита расплавленного металла создается органическими составляющими покрытия и карбонатами при нагревании и плавлении электрода, а раскисление обеспечивается ферромарганцем. Образующиеся шлаки, обычно кислые, не содержат СаО и не очищают металл от фосфора. В наплавленном металле много растворенного кислорода (до 0,12 %), водорода (до 15 см<sup>3</sup>/100 г металла) и неметаллических включений. При повышенном содержании серы в основном металле проявляется склонность металла шва к образованию горячих трещин, в то же время наплавленный металл не склонен к образованию пор при наличии на свариваемых поверхностях окалина или ржавчины и при случайном удлинении дуги. В монтажных условиях эти электроды применяют для сварки металлоконструкций.

## Электроды с основным покрытием вида Б

Шлакообразующую основу покрытия электродов (УОНИ-13/45, ВСФ-65, ВСФС-50 и др.) составляют карбонаты кальция (мрамор, мел, магнезит) и фториды кальция (плавиковый шпат, фтористый концентрат). Газовая защита расплавленного металла обеспечивается углекислым газом и окисью углерода при диссоциации карбонатов. Наплавленный металл раскисляется ферромарганцем, ферросилицием, а иногда ферротитаном и ферроалюминием. Эти покрытия слабо окисленные, поэтому позволяют легировать расплавленный металл элементами с большим сродством к кислороду. Наличие большого количества соединений кальция, хорошо связывающих серу и фосфор с выделением их в шлак, обеспечивает высокую чистоту наплавленного металла, его повышенные пластические свойства при низких температурах, а легирование марганцем и кремнием придает соединению высокую прочность. Наплавленный металл содержит незначительное количество кислорода (менее 0,05 %) и водорода (4—10 см<sup>3</sup>/100 г металла), мало склонен к старению и стоек против образования кристаллизационных трещин. Электроды с основным покрытием рекомендуют для сварки особо ответственных конструкций, какими являются магистральные трубопроводы, шаровые и цилиндрические резервуары и другие сварные конструкции нефтяной и газовой промышленности. Наличие масла, окалины или ржавчины на кромках свариваемого изделия, а также увеличение толщины покрытия и длины дуги для этих электродов приводят к образованию пор в металле шва. Для качественной сварки

необходимо строго выполнять требования по подготовке изделий и электродов к работе и выдерживать технологический режим процесса.

### Электроды с рутиловым покрытием вида Р

Основу электродов с рутиловым покрытием (АНО-3, ОЗС-4, МР-3 и др.) составляют шлакообразующий компонент — рутиловый концентрат  $\text{TiO}_2$  (до 45 %), а также алюмосиликаты (слюда, полевой шпат и др.) и карбонаты (мрамор, магнезит). Газовая защита расплавленного металла обеспечивается введением органических соединений (до 5 %), а также разложением карбонатов. Наплавленный металл раскисляется ферромарганцем (в покрытии менее 10—15 %) и содержит кислорода 0,06—0,09 %, а водорода до 30 см<sup>3</sup>/100 г металла. Склонность металла шва к кристаллизационным трещинам у электродов с рутиловым покрытием примерно такая же, как и у электродов с кислым покрытием. В металле шва могут появляться поры при колебаниях длины дуги, при окисленной и загрязненной поверхности. Электроды с рутиловым покрытием применяют для сварки металлоконструкций и трубопроводов из малоуглеродистых сталей.

### Электроды с целлюлозным покрытием вида Ц

Основой покрытия этих электродов (ВСЦ-4А, ВСЦ-Т и др.) являются органические составляющие (целлюлоза, асбест, травяная мука), которые в процессе плавления обеспечивают газовую защиту расплавленного металла. В качестве шлакообразующих добавок применяют рутил, карбонаты, алюмосиликаты и др. Покрытие содержит ферромарганец для раскисления наплавленного металла и наносится слоем повышенной толщины. При сварке на торце электрода образуется втулка из нерасплавившегося покрытия, что способствует образованию направленного потока газов в результате разложения органических веществ, а это обеспечивает оттеснение жидкого металла из-под дуги и более глубокое проплавление основного металла. По свойствам наплавленного металла эти электроды близки к рутиловым. Ценные качества газозащитных электродов — легкое отделение шлака от наплавленного металла, высокий коэффициент наплавки и возможность сварки сверху вниз при соединении неповоротных стыков магистральных трубопроводов, что создает возможность для повышения темпа сварочно-монтажных работ. Электроды с газозащитным покрытием содержат до 0,03 % кислорода в наплавленном металле, а содержание водорода не превышает количества, соответствующего рутиловым

электродам. Обмазка электродов обладает повышенной гигроскопичностью, она не допускает перегрева как в процессе сушки, так и при сварке.

### Электроды, содержащие в покрытии железный порошок БЖ

Введение в покрытие железного порошка до 20 % улучшает технологические свойства электродов (стабильность горения дуги, равномерность расплавления покрытия и др.). При содержании в покрытии порошка до 60 % повышается производительность сварки, так как в ванну вводится дополнительный металл. Коэффициент массы покрытий таких электродов составляет 1,2—1,8. При расплавлении таких электродов образуется втулка из покрытия, которая предотвращает возможное короткое замыкание сварочной цепи. В монтажных условиях применяют электроды АНО-10, АНО-16, АНО-17, С-1, С-2, которые позволяют с высоким коэффициентом наплавки вести сварку сверху вниз при выполнении неповоротных стыков технологических трубопроводов (табл. 7).

Таблица 7

#### ЭЛЕКТРОДЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ТРУБОПРОВОДНОМ И РЕЗЕРВУАРНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

| Тип  | Марка      | $\sigma_B$ , МПа | $\delta$ , % | $a_n$ ,<br>МДж м <sup>2</sup> | Вид<br>покрытия | Коэффициент<br>наплавки,<br>г (А·ч) |
|------|------------|------------------|--------------|-------------------------------|-----------------|-------------------------------------|
|      |            | Не менее         |              |                               |                 |                                     |
| Э42  | ВСЦ-4      | 440              | 20           | 1,1                           | Ц               | 10,5                                |
| Э42А | УОНИ-13/45 | 460              | 26           | 2,2                           | Б               | 8,5                                 |
| Э42А | СМ-11      | 480              | 28           | 2,2                           | Б               | 9,5                                 |
| Э46  | МР-3       | 480              | 25           | 1,5                           | Р               | 7,8                                 |
| Э46  | ОЗС-4      | 480              | 23           | 1,2                           | Р               | 8,5                                 |
| Э46  | АНО-3      | 480              | 25           | 1,5                           | Р               | 8,5                                 |
| Э46  | АНО-4      | 480              | 25           | 1,5                           | Р               | 8,3                                 |
| Э50  | ВСЦ-4А     | 510              | 18           | 1,0                           | Ц               | 10,5                                |
| Э50  | ВСЦ-Т      | 500              | 18           | 1,0                           | Ц               | 13,0                                |
| Э50А | УОНИ-13/55 | 520              | 24           | 2,0                           | Б               | 9,0                                 |
| Э50А | ВСФС-50    | 550              | 25           | 2,2                           | Б               | 9,5                                 |
| Э55  | ВСФ-60     | 570              | 28           | 1,8                           | Б               | 9,5                                 |
| Э60  | ВСФС-60    | 600              | 25           | 2,4                           | Б               | 9,0                                 |
| Э60А | ВСФ-65     | 650              | 22           | 1,6                           | Б               | 9,7                                 |
| Э70  | ВСФ-75     | 750              | 18           | 1,2                           | Б               | 9,5                                 |

Примечание. Электроды Э42—Э55 применяют для сталей 09Г2С; 17ГС; 17Г1С; 10Г2С1; 14ХГС; Ст2пс; 10; 20; и др. Электроды Э60—Э70 применяют для сталей 15Г2АФ; 16Г2АФ; 17Г2СФ; 17Г2САФ; 18Г2САФ; 18ХГ2СФ и др.

### Подготовка электродов к сварке

В покрытиях электродов имеются соединения кальция, целлюлозы, асбест и другие гигроскопические добавки, которые усваивают влагу из воздуха. На увлажнение покрытия оказы-

вают влияние такие факторы, как тип упаковки электродов, абсолютная и относительная влажность, температура окружающего воздуха, время пребывания электродного покрытия на воздухе или в сыром помещении. Повышенное содержание диффузионного водорода в шве приводит к пористости соединений и созданию условий для зоны термического влияния к образованию холодных трещин. Наиболее надежной упаковкой для хранения электродов являются запаянные металлические банки. В отсыревшем целлюлозном покрытии происходят необратимые структурные изменения, резко ухудшающие не только адгезию покрытия к стержню, но и сварочно-технологические свойства электродов. На монтажной площадке не допускается хранение электродов с основным покрытием (как и с любым другим) в раскрытых пачках более 4 ч. Перед сваркой электроды с основным покрытием прокаливают при температуре 350—400 °С в течение 1 ч, а электроды с рутиловым покрытием прокаливают при 180—200 °С. Электроды с целлюлозным покрытием (марки ВСЦ) просушивают при температуре 80—100 °С во избежание разрушения покрытия. Просушивание и прокаливание электродов должно осуществляться в шахтных и камерных электропечах, что исключает непосредственное воздействие на покрытие пламени, высокотемпературного излучения и др.

## Материалы для автоматической сварки

### Флюсы

Флюсы для автоматической и полуавтоматической сварки сталей можно классифицировать по следующим основным признакам: назначению, способу изготовления, химическому составу, строению и размеру частиц. Существуют флюсы общего назначения и специальные. Флюсы общего назначения используют для механизированной дуговой сварки и наплавки углеродистых и низколегированных сталей. Флюсы специальные применяют для электрошлаковой сварки, сварки легированных сталей и т. п.

По способу изготовления флюсы делятся на плавные и неплавные. Плавные флюсы получают сплавлением окислов и солей металлов в пламенных или электрических печах, а затем измельчают — гранулируют. После мокрой грануляции сушат и просеивают. К неплавленным флюсам относятся керамические, спеченные и флюсы-смеси. Керамические флюсы не подвергают расплавлению, а получают после замеса различного сочетания ферросплавов и других легирующих элементов на жидком стекле. Затем массу гранулируют, сушат и прокаливают. С помощью керамических флюсов легко получить любой требуемый состав наплавленного металла, но химический

состав металла шва сильно зависит от режима сварки. Изменение сварочного тока, и особенно напряжения дуги, изменяет соотношение масс расплавленных флюса и металла, что приводит к неоднородности состава металла шва по его длине. Кроме этого, керамический флюс легко разрушается из-за малой механической прочности его частиц, что делает его разнородным по размерам. При сварке магистральных трубопроводов, резервуаров и других конструкций применяют обычно плавные флюсы (АН-348А, АН-348АМ, АН-22, АН-26С, АН-43, АН-47 и др.) и значительно реже керамические (КВС-19, КВС-19М и АНК-30).

По химическому составу флюсы различают в зависимости от содержания в них окислов и солей металлов. Окисленные флюсы содержат в основном окислы  $MnO$  и  $SiO_2$ . Для получения необходимых свойств флюса в него вводят и другие составные, например плавиковый шпат, а также окислы  $CaO$ ,  $MgO$ ,  $Al_2O_3$ , которые в сварочных условиях практически не реагируют с металлом. При большом содержании во флюсе  $MnO$  и  $SiO_2$  проявляется возможность легирования металла марганцем и кремнием, но одновременно и его окисление. Чем сложнее легирована сталь, тем меньше должно содержаться во флюсе  $MnO$  и  $SiO_2$ . Если это не соблюдается, то недопустимо возрастает окисление легирующих элементов в стали. Нежелательным может быть и дополнительное легирование металла кремнием и марганцем. Окислительные флюсы преимущественно применяют для сварки углеродистых и низколегированных сталей. Безокислительные флюсы содержат фториды  $CaF_2$ , прочные окислы металлов и практически не имеют окислов кремния и марганца. Эти флюсы преимущественно используют для сварки высоколегированных сталей. Химическая активность флюса тесно связана с химическим составом металла, особенно проволоки. Поэтому подбор сварочных материалов при сварке флюсом той или иной стали предусматривает применение флюсов и проволоки одновременно (табл. 8). Флюсы различают также и по размеру зерен. Так, флюсы АН-348А, АН-26П имеют размер зерен 0,35—3 мм, флюсы АН-348АМ, ОСЦ-45М — 1,6 мм, флюсы АН-22 и АН-26С — 0,35—4 мм. По строению частиц плавные флюсы разделяют на стекловидные (АН-348А, АН-348АМ, АН-22, АН-26С), пемзовидные (АН-60) и кристаллические. В обозначении марки флюса буквы означают: М — мелкий, С — стекловидный, П — пемзовидный, СП — смешанный. Для автоматической сварки трубопроводов, резервуаров и других конструкций используют стекловидный флюс с размером зерен не более 2,5—3 мм и пемзовидный — с размером зерен не более 4 мм с проволокой диаметром не менее 3 мм. Для автоматической и полуавтоматической сварки проволокой диаметром 3 мм применяют стекловидный флюс с размером зерен не более 1,6 мм.

## ФЛЮСЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ В ТРУБОПРОВОДНОМ И РЕЗЕРВУАРНОМ СТРОИТЕЛЬСТВЕ

| Марка   | Состав, %        |       |           |       |                  |                                |                                |                  |                  |                               |      |      | Марка проволоки | Марка сталей свариваемых конструкций                                                        |
|---------|------------------|-------|-----------|-------|------------------|--------------------------------|--------------------------------|------------------|------------------|-------------------------------|------|------|-----------------|---------------------------------------------------------------------------------------------|
|         | SiO <sub>2</sub> | MnO   | MgO       | CaO   | CaF <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | ZnO <sub>2</sub> | TiO <sub>2</sub> | F <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | S    | P    |                 |                                                                                             |
|         |                  |       |           |       |                  |                                |                                |                  |                  | Не более                      |      |      |                 |                                                                                             |
| АН-348А | 41—44            | 34—38 | 5,5—7,5   | 6,5   | 4—5,5            | 4,5                            | 0,1—0,3                        | —                | —                | 2                             | 0,15 | 0,12 | Св08А           | Ст. 3; Ст. 10;<br>Ст. 20 и т. п.                                                            |
| АН-22   | 18—21,5          | 7—9   | 11,5—15,0 | 12—15 | 20—24            | 19—23                          | —                              | —                | —                | 1                             | 0,05 | 0,05 | Св08ГА          | 17ГС; 14ХГС;<br>09Г2С и т. д.                                                               |
|         |                  |       |           |       |                  |                                |                                |                  |                  |                               |      |      | Св08ХМ          | 15Г2АФ; 16Г2АФ;<br>17Г2СФ                                                                   |
| АН-43   | 18—20            | 6,3   | 1         | 15,5  | 20,4             | 36,7                           | —                              | —                | —                | 2                             | 0,05 | 0,05 | Св08ГМ          | 17Г2САФ;<br>18Г2САФ;<br>18ХГ2СФ;<br>Х60—Х70<br>(по американ-<br>скому стандарту)<br>и т. п. |
|         |                  |       |           |       |                  |                                |                                |                  |                  |                               |      |      | Св08ГМ          | Х60 (по амери-<br>канскому<br>стандарту)<br>и т. п.                                         |
| АН-47   | 28—32            | 14—18 | 6,5—10,5  | 13—17 | 9—13             | 9—13                           | —                              | 1,25             | 4,7              | 2                             | 0,05 | 0,08 | Св08ГА          | То же                                                                                       |
|         |                  |       |           |       |                  |                                |                                |                  |                  |                               |      |      | Св08ХМ          | Х60—Х70 (по<br>американскому<br>стандарту)<br>и т. п.                                       |
|         |                  |       |           |       |                  |                                |                                |                  |                  |                               |      |      | Св08ГМ          | То же                                                                                       |



## Электродная проволока

Электродную стальную проволоку применяют для ручной дуговой сварки, для автоматической сварки под флюсом и для сварки в среде углекислого газа. Применение активных марганцевых флюсов при сварке допускает использование низкоуглеродистой электродной проволоки. В отдельных случаях находят применение проволока легированная кремнием и марганцем, а также проволока с повышенным содержанием марганца. Значительная плотность тока, употребляемая при сварке под флюсом, обуславливает применение проволоки диаметром до 5 мм включительно.

Сварочную проволоку изготавливают по ГОСТ 2246—70 и по специальным техническим условиям. По химическому составу проволока разделяется на низкоуглеродистую, легированную и высоколегированную. В условное обозначение проволоки входит: диаметр, марка (начинается с букв «Св» — сварочная), индекс наличия омедненного слоя (О), номер ГОСТа. Например, 3-Св-08ГАО (ГОСТ 2246—70) означает: проволока сварочная диаметром 3 мм марки 08ГА с омедненной поверхностью.

Проволоки Св-08, Св-08А и Св-08АА изготавливают из кипящей стали. Остальную низкоуглеродистую сварочную проволоку изготавливают из полуспокойной стали (табл. 9). Для ручной сварки углеродистых сталей электроды изготавливают из проволоки марок Св-08, Св-08А. При ручной сварке высоколегированных сталей применяют проволоки Св-08ХМ, Св-10Х5М, Св-08ХМФА и др. Проволоку Св-08 применяют при сварке под флюсом большинства углеродистых и некоторых низколегированных сталей. При повышенном содержании в стали серы или фосфора рекомендуют проволоки Св-08А и Св-08ГА. При сварке марганцевыми флюсами, а также при сварке низколегированных сталей повышенной прочности могут применяться проволоки Св-08ГА, Св-08ХМ, Св-10ГА, Св-12ГС и Св-12М.

Автоматическую и полуавтоматическую сварку в среде углекислого газа осуществляют проволоками диаметром 0,5—2 мм и реже диаметром 2,5—3 мм. Для газозащитной сварки проволоки имеют высокое содержание Mn ( $>1,7\%$ ) и повышенное содержание Si ( $0,7\%$ ). Проволоки, легированные Ti, Al, Zr, могут содержать меньше Si. Проволоки, предназначенные для сварки сталей повышенной прочности, могут быть дополнительно легированы Mo ( $0,3—0,6\%$ ), а предотвращение пористости швов обеспечивается соблюдением отношения Mn/Si в пределах 1,4—1,6. Для сварки в среде углекислого газа применяют проволоки Св-08ГС, Св-08Г2С, Св-10ХГ2СМА, Св-08ХГ2С, Св-08Г2СМ и др.

При доставке проволоки на сварочный участок ее поверхность покрыта тончайшим слоем технологической смазки,

Таблица 9

## ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ СВАРОЧНЫХ ПРОВОЛОК РАСПРОСТРАНЕННЫХ МАРОК (в %)

| Марка проволоки              | C         | Si        | Mn         | Cr        | Ni   | Mo        | Ti        | S        | P     | Прочие<br>элементы                                  |
|------------------------------|-----------|-----------|------------|-----------|------|-----------|-----------|----------|-------|-----------------------------------------------------|
|                              | Не более  |           |            | Не более  |      |           |           | Не более |       |                                                     |
| Низкоуглеродистая проволока  |           |           |            |           |      |           |           |          |       |                                                     |
| Св-08                        | 0,10      | 0,03      | 0,35—0,60  | 0,15      | 0,30 | —         | —         | 0,040    | 0,040 | Al, не более<br>0,01                                |
| Св-08А                       | 0,10      | 0,03      | 0,35—0,60  | 0,12      | 0,25 | —         | —         | 0,030    | 0,030 | То же                                               |
| Св-08АА                      | 0,10      | 0,03      | 0,035—0,60 | 0,10      | 0,25 | —         | —         | 0,020    | 0,020 | —                                                   |
| Св-08ГА                      | 0,10      | 0,03      | 0,8—1,10   | 0,10      | 0,25 | —         | —         | 0,025    | 0,030 | —                                                   |
| Св-10ГА                      | 0,12      | 0,03      | 1,10—1,40  | 0,20      | 0,30 | —         | —         | 0,025    | 0,030 | —                                                   |
| Легированная проволока       |           |           |            |           |      |           |           |          |       |                                                     |
| Св-08ГС                      | 0,10      | 0,60—0,85 | 1,40—1,70  | 0,20      | 0,25 | —         | —         | 0,025    | 0,030 | —                                                   |
| Св-08Г2С                     | 0,05—0,11 | 0,70—0,95 | 1,80—2,10  | 0,20      | 0,25 | —         | —         | 0,025    | 0,030 | —                                                   |
| Св-08МХ                      | 0,06—0,10 | 0,12—0,30 | 0,35—0,6   | 0,45—0,65 | 0,30 | 0,40—0,60 | —         | 0,025    | 0,030 | —                                                   |
| Св-08ХМ                      | 0,06—0,10 | 0,12—0,30 | 0,35—0,6   | 0,90—1,20 | 0,30 | 0,50—0,70 | —         | 0,025    | 0,030 | —                                                   |
| Св-08Г2С                     | 0,05—0,11 | 0,70—0,95 | 1,7—2,1    | 0,7—1,0   | —    | —         | —         | 0,025    | 0,030 | —                                                   |
| Св-08Г2СМ                    | 0,05—0,11 | 0,70—0,95 | 1,8—2,1    | —         | —    | 0,4—0,6   | —         | 0,025    | 0,025 | —                                                   |
| Св-10ХГ2СМА                  | 0,07—0,12 | 0,60—0,90 | 1,7—2,1    | 0,8—1,1   | —    | 0,4—0,6   | —         | 0,025    | 0,025 | —                                                   |
| Св-15ГСТЮЦА                  | 0,12—0,18 | 0,45—0,85 | 0,60—1,0   | 0,30      | 0,40 | —         | 0,05—0,20 | 0,025    | 0,025 | Al 0,02—0,50<br>Zr 0,05—0,15<br>Ce, не менее<br>0,4 |
| Св-20ГСТЮА                   | 0,17—0,23 | 0,60—0,90 | 0,90—1,2   | 0,30      | 0,40 | —         | 0,10—0,20 | 0,025    | 0,025 | Al 0,20—0,50<br>Ce 0,30—0,45<br>V 0,15—0,3          |
| Св-08ХМФА                    | 0,06—0,1  | 0,12—0,3  | 0,35—0,6   | 0,9—1,2   | 0,3  | 0,5—0,7   | —         | 0,025    | 0,025 | —                                                   |
| Св-10Х5М                     | 0,12      | 0,12—0,35 | 0,4—0,7    | 4—5,5     | 0,3  | 0,4—0,6   | —         | 0,025    | 0,03  | —                                                   |
| Высоколегированная проволока |           |           |            |           |      |           |           |          |       |                                                     |
| Св-06Х19Н9Т                  | 0,08      | 0,4—1     | 1—2        | 18—20     | 8—10 | —         | 0,5—1,0   | 0,015    | 0,03  | —                                                   |
| Св-04Х19Н9С2                 | 0,06      | 2—2,75    | 1—2        | 18—20     | 8—10 | —         | —         | 0,018    | 0,025 | —                                                   |

Примечание. Буква А в конце обозначения марок низкоуглеродистой и легированной проволоки указывает на повышенную чистоту металла по содержанию серы и фосфора. Сдвоенная буква (Св-08АА) указывает на пониженное содержание серы и фосфора по сравнению с проволокой марки Св-08А.

масел, что может ухудшить стабильность горения дуги, повысить разбрызгивание металла, а также способность к образованию пор в шве. Нагрев проволоки перед сваркой на 400 °С предотвращает попадание водорода в металл шва. С этой целью проводят омеднение поверхности проволоки как для сварки в среде защитных газов, так и для сварки под слоем флюса, что упрощает технологический процесс и способствует повышению качества сварных соединений.

Автоматическую сварку арматуры железобетонных конструкций и листовых конструкций выполняют голый легированной проволокой сплошного сечения без дополнительной защиты зоны сварки. Композицию легирующих элементов выбирают из условия обеспечения плотного прочного сварного соединения при минимальном содержании азота в твердом металле. При сварке на воздухе выгорают примеси углерода, кремния, марганца и происходит насыщение наплавленного металла газами (кислородом и азотом), поэтому в состав проволоки вводят элементы-раскислители и элементы, связывающие азот в стойкие нитриды (Al, Ti, Zr), а также углерод, кремний и марганец для повышения качества наплавленного металла. Для сварки без дополнительной защиты применяют проволоку Св-20ГСТЮА. При выполнении швов во всех пространственных положениях используют проволоку Св-15ГСТЮЦА, которая обладает большей устойчивостью против образования пор в сварных соединениях.

### Защитные газы

При сооружении трубопроводов и резервуаров применяют сварку в среде защитных газов. Этот способ сварки предусматривает использование защитной среды в виде аргона, гелия, углекислого газа или их смеси, в зависимости от технологических требований сварочного процесса. Наибольшее распространение в монтажных условиях получила сварка в среде углекислого газа для соединения труб или листов из углеродистых и низколегированных сталей. При сварке труб или листов из алюминиевых сплавов применяют защиту электрической дуги аргоном или гелием.

Углекислый газ бесцветный с едва ощутимым запахом. Плотность углекислого газа по отношению к воздуху составляет 1,524; при испарении 1 кг жидкой углекислоты образуется 509 л газа. Углекислота, предназначенная для сварочного процесса, хранится в стальных баллонах в жидком состоянии под давлением 5—6 МПа. Стандартный баллон вместимостью 40 л содержит 25 кг углекислоты. В углекислом газе не должны содержаться минеральные масла, вода, глицерин и т. п. Повышенное содержание водяных паров в углекислоте может

привести к образованию пор в швах и снизить пластические свойства. Парциальное давление паров воды в углекислом газе зависит от его давления, особенно интенсивно повышается влажность при снижении давления ниже 1 МПа. Большую часть оставшейся воды можно удалить через вентиль после опрокидывания баллона. Для того чтобы в зону сварки не попадала влага, углекислый газ пропускают через влагоотделитель, наполненный силикагелем, медным купоросом или другим осушающим реагентом. Влагоотделяющий порошок перед сваркой прокалывают при температуре 200—250 °С в течение 1—2 ч, повторяют подобную операцию один раз в 10—15 дней в зависимости от интенсивности загрузки сварочного полуавтомата или автомата. Расход углекислого газа при сварке можно рассчитать по формуле  $C = nK$ , где  $C$  — расход углекислого газа;  $n$  — расход сварочной проволоки;  $K$  — коэффициент, зависящий от режима сварки и диаметра проволоки. При диаметрах проволоки 0,8—2 мм коэффициент  $K$  меняется от 1,5 до 0,9.

Обычно при сварке проволокой диаметром 0,5—1,2 мм расход углекислого газа составляет 5—12 л/мин, при диаметре проволоки 1,6—3 мм — 14—25 л/мин.

Для сварки в трассовых условиях весьма перспективно применение твердой углекислоты, использование которой в 3—3,5 раза снижает транспортные расходы. Охлажденная до —78,5 °С при нормальном давлении углекислота превращается в твердое вещество, которое при нагреве сублимирует с выделением 500 л углекислого газа из 1 кг льда. Сухой лед перевозят в изотермических контейнерах, двойные стенки которых изолированы от внешней среды тепловой изоляцией. При сварке сухой лед помещают в газификатор — полный стальной сосуд, рассчитанный на давление 0,8—1 МПа, и обогревают электроподогревателем для интенсификации испарения углекислого газа.

Газообразный аргон относится к группе газов, которые химически не взаимодействуют со свариваемым металлом. Чистый газообразный аргон поставляется трех сортов: высший, первый и второй. В зависимости от сорта его содержание равно 99,99; 99,98; 99,95 %; примеси — кислород, азот и влага. Аргон высшего сорта обычно используют для сварки очень активных и редких металлов (титан, ниобий, цирконий) и сплавов на их основе, а также для других ответственных материалов. Для сварки плавящимся металлическим и неплавящимся вольфрамовым электродами различных сплавов на основе алюминия, магния применяют аргон первого сорта. Аргон второго сорта используют при сварке алюминия, легированных сталей различных марок, а также нержавеющей хромоникелевых жаропрочных сталей. Хранят и транспортируют аргон в стальных баллонах под давлением 14,7 МПа.

## Порошковая проволока

Порошковая проволока представляет собой толкостенную металлическую трубку, имеющую сложное внутреннее сечение и заполненную шихтой. Эта шихта необходима для создания в процессе сварки газовой и шлаковой защиты, а также раскисления и дополнительного легирования наплавленного металла. Шихта обычно имеет состав подобный электродным покрытиям Б или Р. На качество порошковой проволоки оказывает влияние не только состав шихты, но также тонкость помола ее компонентов, однородность смеси и равномерность заполнения проволоки по ее длине. Порошковую проволоку изготавливают из холоднокатаной стальной ленты Св-08 в заводских

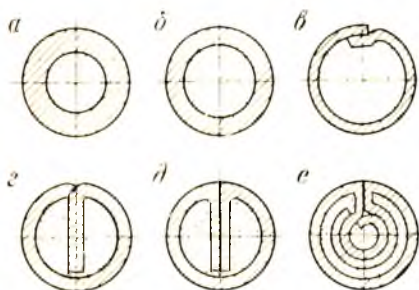


Рис. 46. ОСНОВНЫЕ КОНСТРУКЦИИ ПОРОШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ

условиях на волочильных станках. Стальная лента формируется в трубку с одновременным заполнением ее полости порошком и обжатием. Характеристикой порошковой проволоки является коэффициент заполнения  $K_z$ , который определяется по формуле

$$K_z = \frac{M_{\text{пр}} - M_{\text{д}}}{M_{\text{пр}}} 100,$$

где  $M_{\text{пр}}$  — масса проволоки с шихтой;  $M_{\text{д}}$  — масса стальной ленты.

Коэффициент заполнения порошковой проволоки составляет 15—50 % при диаметрах проволоки 1,4—3,2 мм. Добавление железного порошка в шихту проволоки повышает производительность.

Применение проволок с различными поперечными сечениями оказывает влияние на защиту наплавленного металла от окружающей атмосферы. Проволоки простых конструкций (рис. 46, а, б, в) обычно применяют для сварки в среде углекислого газа. Проволоки сложных конструкций (рис. 46, г, д) применяют без дополнительной защиты. Особенно надежную защиту обеспечивают проволоки двухслесной конструкции (рис. 46, е). По составу сердечника проволоки подразделяют на пять типов: рутилорганические, карбонатно-флюоритные, флюоритные, рutilовые и рutilфлюоритные. Проволоки первых трех типов применяют, как правило, без дополнительной защиты, а последние используют для сварки в среде углекислого газа. Наиболее широко в монтажных условиях порошковую проволоку применяют для сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей, что обусловлено возможностью варьирования химического состава и массы наполнителя — порошкообразной шихты, обеспечивающей высокое качество свар-



ных соединений. Для дуговой сварки трубопроводов и резервуаров без дополнительной защиты от воздуха применяют проволоки ПП-АН19, ПП-АН24, ПП-2ВДСК, ПП-АН7, ПП-2ДСК, ПП-АН3, ЭПС-15/2, ПП-1ДСК и др. Для дуговой сварки в среде углекислого газа используют проволоки ПП-АНЗС, ПП-АН5, ПП-АН9 и др.

## Глава

### СБОРКА ПОД СВАРКУ СТЫКОВ ТРУБ И СБОРОЧНЫЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ

Современные методы сварки позволяют получать качественные сварные соединения при условии обеспечения незначительных смещений кромок труб (2—3 мм) во время сборочных операций. При расчете на прочность высота шва  $h$  принимается равной толщине основного металла, т. е.  $h=S$ , и шов считается равнопрочным основному металлу. Это достигается, когда основания свариваемых кромок труб лежат в одной плоскости  $PP$  (рис. 47). Если имеется отклонение (при заданном зазоре  $b$ ) от номинального диаметра  $D_{ном}$  одной из сопрягаемых труб, то происходит смещение кромок. Смещение

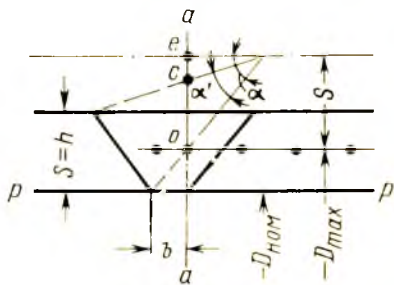


Рис. 47. СХЕМА ОБРАЗОВАНИЯ ОТКЛОНЕНИЙ ПРИ СБОРКЕ СТЫКОВ ПОД СВАРКУ

кромки по линии  $aa$  приводит к уменьшению расчетной высоты шва  $h$  и угла  $\alpha$  (при сравнении отрезков  $oe$  и  $oc$  или углов  $\alpha$  и  $\alpha'$ ). Поэтому возникает необходимость свести возможные отклонения к минимально допустимым. Несовпадение кромок труб при сварке плавлением, кроме уменьшения расчетной высоты шва, ухудшает условия равномерного прогрева и сплавления корня шва. В местах, где одна из кромок смещена по линии  $aa$  на значительную величину, часто наблюдаются несплавления и прожоги. Причиной несовпадения кромок при сборке стыков могут являться разнотолщинность и эллиптичность цельнотянутых труб, значительные отклонения по длине окружности сварных труб, местные вмятины, связанные с транспортировкой и разгрузкой, а также выхваты, вызванные неправильной обработкой концов труб. Эти отклонения вызывают необходимость дополнительной подгонки концов труб при сборке в трассовых условиях.



Сборочные операции могут производиться на сварочной базе при вращении стыкуемых труб и в неповоротном положении, на трассе в неповоротном положении (при сборке секций в нитку, при сборке захлестов, установке задвижек и т. п.), на трассе с помощью сварочной головки в неповоротном положении (при прессовых методах сварки).

Сборка стыков труб под сварку включает следующие виды работ: подготовку труб (правка концов и очистка поверхности свариваемых кромок), установку труб, стяжку и центровку труб, проверку сопряжений кромок и сборочных баз, подгонку сопрягаемых элементов деталей, закрепление (фиксацию) свариваемых кромок.

## ПОДГОТОВКА ТРУБ К СБОРКЕ

Трубы, изготавливаемые на трубопрокатных заводах, доставляют на трассу в различное время года и разными транспортными средствами. Поэтому при транспортировке, хранении и погрузочно-разгрузочных работах они могут покрыться ржавчиной, изменить точную форму и т. п., что требует перед сборкой и сваркой выполнения следующих подготовительных работ.

*Очистку внутренней полости труб* от возможных загрязнений, снега, льда и случайных предметов выполняют до сборки. На механизированных линиях загрязнения и случайные предметы удаляют ершом, который укрепляют на центраторе. В процессе прохода центратора внутри трубы ерш удаляет их автоматически. Попавшие внутрь трубы камни, грунт и посторонние предметы могут нарушить технологический процесс сборки и сварки при сооружении трубопровода, а также причинить вред готовой линии во время ее продувки и эксплуатации.

*Правку деформированных концов труб* глубиной до 3,5 % диаметра трубы можно выполнять с помощью устройства для правки вмятин УПВ-141. Это устройство применяют для правки вмятин на трубах диаметром 630—1420 мм с толщиной стенок до 22 мм. В качестве рабочего органа используют гидравлический домкрат с усилием 300 кН. Для труб из стали с  $\sigma_b$  до 539 МПа допускается правка вмятин и деформированных концов при положительной температуре без подогрева. При отрицательной температуре окружающего воздуха проводят местный подогрев до 100—150 °С. Правку труб из стали с  $\sigma_b \geq 539$  МПа осуществляют с местным нагревом до 150—200 °С при любых температурах окружающего воздуха. Участки труб с вмятинами глубиной более 3,5 % диаметра, а также с резкими деформированными краями, имеющими надрывы и надрезы, обрезают ацетилено-кислородной резкой или механическим способом.

*Подготовку кромок труб к сварке* начинают с выявления забоин и задиrow на фасках глубиной до 5 мм, которые заправ-

ляют узкими ниточными валиками, а затем шлифовальной машинкой или напильником выполняют скос кромок с притуплением. При наплавке валика на кромки из стали, которая требует подогрева, место наплавки подогревают до температуры 150—200 °С. Для двусторонней сварки под флюсом и для сварки в среде углекислого газа форму кромок труб готовят в трассовых условиях специальными лобовыми станками. Необходимый скос кромок и притупление создают таким образом, чтобы увеличить производительность процесса и обеспечить высокое качество сварных соединений.

**Зачистка кромок.** Перед сборкой кромок и прилегающие к ним внутреннюю и наружную поверхности труб шириной не менее 10 мм зачищают до металлического блеска абразивным инструментом или напильником.

Для электроконтактной сварки на концах труб зачищают полосу шириной 100 мм под контактные башмаки (на расстоянии 50 мм от торца трубы).

### СБОРКА ТРУБ ПОД СВАРКУ

Процесс сборки труб под сварку предусматривает технологическую операцию — центровку, в результате которой две сопрягаемые трубы становятся соосными. При сборке прямолинейных труб в секции необходимо, чтобы их оси совпадали. Для сборки криволинейных труб требуется совпадение касательных ( $AO$  и  $OC$ ) к осям в точке  $O$ , являющейся местом пересечения осей труб с плоскостью  $N$ , проходящей по середине зазора  $b$  собираемого стыка (рис. 48). Для обеспечения совпадения мнимых осей сопрягаемых труб используют их поверхности (а также линии и точки), которые обеспечивают требуемую ориентацию труб при центровке. Эти поверхности (линии и точки) называют *базирующими элементами*, а придаваемое трубе положение, определяемое базирующими элементами, называют ее *базированием*. При центровке труб в качестве базирующих элементов используют следующие поверхности и линии: наружную цилиндрическую поверхность (НП), внутреннюю цилиндрическую поверхность (ВП), торцовую плоскость кромок (ТП), образующие линии на наружной цилиндрической поверхности (ОЛ), которые могут иметь по две опорные точки (ОТ). Можно считать, что совпадение соответствующих базирующих поверхностей, линий или точек одной и другой трубы или определенное их взаимное расположение обеспечит совпадение осей, соединяемых труб. Рассмотрим несколько независимых условий, соблюдение которых позволит обеспечить качественную сборку соединяемых труб. В этом случае базирующие элементы первой трубы обозначим одним штрихом, а второй трубы — двумя штрихами. Условия соосности труб (рис. 49) можно записать так:  $I - (НП)' \equiv НП$ ,  $II - (ВП)' \equiv ВП$ ,  $III - ТП' \equiv ТП$ ,  $IV -$

$2ОЛ' \equiv 2(ОЛ)$  при  $0 < \alpha < \pi$  (на рисунке не показано). Здесь  $\alpha$  — угол между опорами;  $\equiv$  — знак совпадения базисуемых поверхностей, линий и точек. Центровку труб выполняют различными механизмами и приспособлениями в зависимости от применяемого способа сварки. Условие I выполняется при центровке труб для дуговой сварки с применением кондукторов

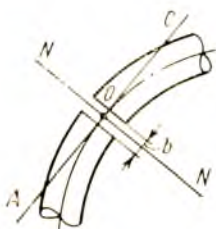


Рис. 48. СХЕМА ЦЕНТРОВКИ ТРУБ ПОД СВАРКУ

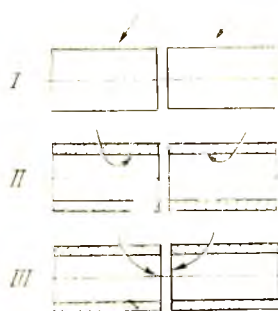


Рис. 49. УСЛОВИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СООСНОСТИ ДВУХ ТРУБ ПРИ СБОРКЕ

в виде опор, при сборке труб наружными центраторами и в зажимных устройствах электроконтактной сварки и т. п. Условие II получило широкое распространение при сборке труб с применением внутреннего центратора. Условие III используют в том случае, когда торцовые плоскости перпендикулярны к оси трубы. Подобное условие выполняют при сборке труб различ-

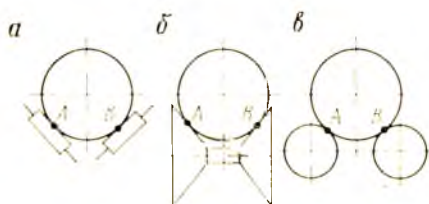


Рис. 50. ПОЛОЖЕНИЕ ТРУБ ПРИ СБОРКЕ

ных диаметров, когда используют специальные переходы. Условие IV основано на совпадении линий или точек, его используют при центровке труб на сборочных кондукторах, которые изготовляют из труб или швеллеров. Сборку стыков при выполнении условия I особенно широко применяют при поворотной сварке стыков магистральных трубопроводов. Сборочные операции выполняют на стендах, стеллажах и кондукторах.

Трубы, предназначенные для центровки, укладывают на ложе рольганга или кондуктора. Эти трубы соприкасаются с поверхностью роликов (рис. 50, а, б), или других труб (рис. 50, в) в точках А и В. При сборке стыков на роликах за базовые

поверхности принимают цилиндрические поверхности труб. Для обеспечения устойчивого положения трубы при центровке необходимо, чтобы расстояние между опорами было возможно большим. Это снижает влияние макрогеометрических погрешностей базовых поверхностей на положение трубы на стенде. Центровку на стеллажах из труб осуществляют на основе базовых поверхностей труб, которые могут быть представлены образующими линиями. Для обеспечения точности центровки непосредственно перед сваркой стыка устанавливают центратор. При сборке стыков трубопроводов для обеспечения провара корня шва между кромками труб устанавливают определенный

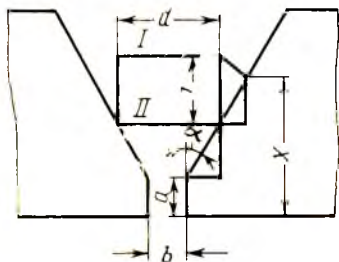


Рис. 51. СХЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ЗАЗОРА ПРИ РУЧНОЙ СВАРКЕ:

*I* — нормальное положение электрода;  
*II* — короткое замыкание

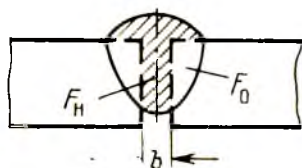


Рис. 52. СХЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДОЛИ УЧАСТИЯ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА В МЕТАЛЛЕ ШВА

зазор. Зазор для ручной сварки может быть определен (рис. 51) по формуле

$$x = a + \frac{1}{2 \operatorname{tg} \alpha} (d - b + l \sin 2\alpha),$$

где  $x$  — толщина первого слоя шва (глубина проплавления);  $a$  — притупление;  $d$  — диаметр электрода;  $b$  — сварочный зазор;  $l$  — условная длина дуги;  $\alpha$  — угол скоса кромок.

При автоматической сварке под флюсом для шва данного типа, способа и режима сварки зазор определяет в большей мере, чем при ручной сварке, долю участия основного металла в объеме металла шва  $\gamma_0$ . Это условие соблюдается в том случае, когда глубина и ширина кромок не превышают тех же параметров при наплавке на пластину. При неизменном сварочном режиме глубина и контуры провара постоянны и не зависят от типа шва. Доля основного металла в шве (по схеме, приведенной на рис. 52):  $\gamma_0 = F_0 / (F_0 + F_n)$ , где  $F_0$  — площадь проплавленного основного металла;  $F_n$  — площадь наплавленного металла.

Отклонение от заданного зазора  $b$  при постоянном сварочном режиме изменяет  $\gamma_0$  (от 0,15 до 0,8), что влияет на химию

ческий состав металла шва. Это можно установить из соотношения

$$X_{\text{ш}} = \gamma_0 X_{\text{м}} + (1 - \gamma_0) X_2 \pm \Delta X,$$

где  $X_{\text{ш}}$  — содержание элемента в металле шва;  $X_{\text{м}}$  — содержание элемента в основном металле;  $X_2$  — содержание элемента в присадочном (электродном) металле;  $\Delta X$  — величина изменения содержания элемента в результате окислительных и восстановительных реакций.

В зависимости от зазора  $b$  предусматривают меры от протекания металла и шлака через зазор. При двусторонней сварке трубы центрируют с нулевым зазором, что позволяет отказаться от этих мер. Зазор устанавливают из условий режима сварки и размещения наплавленного металла, но его можно определить из соотношения  $l a_{\text{н}} = v_{\text{св}} \cdot 0,6 s b k \rho$ , где  $a_{\text{н}}$  — коэффициент наплавки;  $v_{\text{св}}$  — скорость сварки;  $0,6s$  — глубина провара за один проход;  $k$  — коэффициент, учитывающий усиление шва ( $k = 1,1 \div 1,2$ );  $\rho$  — плотность металла шва.

По строительным нормам и правилам (СНиП) зазоры между кромками при сварке устанавливают в зависимости от методов сварки и толщины труб (табл. 10). При сборке труб с одинаковой толщиной стенки допускается смещение кромок не более 20 % толщины стенки трубы, но не более 3 мм для дуговых методов сварки и не более 2 мм для стыковой электроконтактной сварки.

Таблица 10

ЗАЗОР МЕЖДУ КРОМКАМИ ТРУБ (В ММ)

| Метод сварки                                             | Толщина стенок, мм                                     |                                                        |                                                        |
|----------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|
|                                                          | до 8                                                   | 8—12                                                   | 12 и более                                             |
| Ручная электродуговая:                                   |                                                        |                                                        |                                                        |
| электродами с основным покрытием (УОНИ-13 и подобные им) | $2 \begin{smallmatrix} +1 \\ -0 \end{smallmatrix}$     | $2,5 \begin{smallmatrix} +1 \\ -0 \end{smallmatrix}$   | $3 \begin{smallmatrix} +0,5 \\ -0 \end{smallmatrix}$   |
| с целлюлозным покрытием (ВСЦ и подобные им)              | $1,5 \begin{smallmatrix} +0,5 \\ -0 \end{smallmatrix}$ | $1,5 \begin{smallmatrix} +1,0 \\ -0 \end{smallmatrix}$ | $1,5 \begin{smallmatrix} +1,0 \\ -0 \end{smallmatrix}$ |
| Полуавтоматическая:                                      |                                                        |                                                        |                                                        |
| порошковой проволокой                                    | $2 \begin{smallmatrix} +1 \\ -0 \end{smallmatrix}$     | $2 \begin{smallmatrix} +1 \\ -0 \end{smallmatrix}$     | $2 \begin{smallmatrix} +1 \\ -0 \end{smallmatrix}$     |
| в среде углекислого газа                                 | $2 \begin{smallmatrix} +1 \\ -0 \end{smallmatrix}$     | $2,0 \begin{smallmatrix} +1 \\ -0 \end{smallmatrix}$   | $2,0 \begin{smallmatrix} +1 \\ -0 \end{smallmatrix}$   |

Соединение разнотолщинных труб одного диаметра или труб с деталями (тройниками, переходами, днищами, отводами) допускается при следующих условиях:

если разность толщин стенок центрируемых труб или труб с деталями (максимальная из которых 12 мм и менее) не превышает 2,5 мм;

если разность толщин стенок центрируемых труб или труб с деталями (максимальная из которых более 12 мм) не превышает 3 мм; соединение труб или труб с деталями с большей разностью толщин стенок осуществляют путем установки между центрируемыми трубами или трубами с деталями переходников или вставок промежуточной толщины, длина которых должна быть не менее 250 мм. При разнотолщинности стенок до 1,5 допускается центровка и сварка труб со специальной разделкой толстой стенки трубы или детали (рис. 53, а). После сварки разностенных труб диаметром 1000 мм проводится внутренняя подварка корня шва по всему периметру. Центровку труб с запорной и распределительной арматурой осуществляют

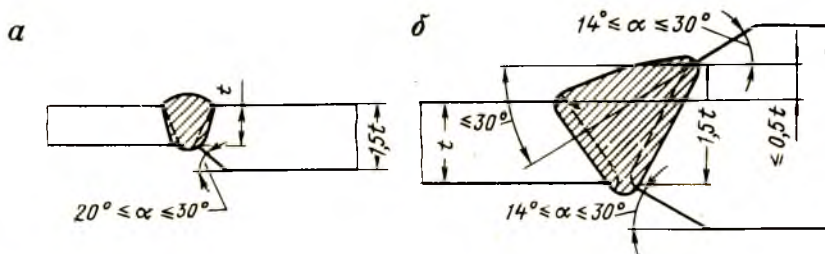


Рис. 53. СХЕМА ПОДГОТОВКИ КРОМК РАЗНОТОЛЩИННЫХ ТРУБ (а) И ПАТРУБКОВ АРМАТУРЫ (б) К СВАРКЕ

при условии, что толщина соединяемой кромки патрубка арматуры не превышает 1,5 толщины стенки стыкуемой с ней трубы в случае специальной подготовки кромок патрубка арматуры в заводских условиях (рис. 53, б). Если приведенные условия не выполняются, то центровку проводят при установке между стыкуемой трубой и арматурой специального переходника или переходного кольца.

### СБОРОЧНЫЕ ПРИСПОСОБЛЕНИЯ

В практике трубопроводного строительства при выполнении сборочных операций применяют приспособления, которые обеспечивают тщательную подгонку свариваемых труб, а также труб с деталями (тройниками, переходами и т. п.). На полевых трубосварочных базах сборочные операции на трубах выполняют с применением стенов, кондукторов и центраторов. Центраторы используют также для сборки и центровки неповоротных стыков труб непосредственно на трассе при монтаже магистральных трубопроводов.

На сборочном стенде при центровке стыков труб выполняется первое условие соосности (совпадение поверхностей, образующих цилиндр трубы). Наиболее распространен стенд



ССТ-141, основным элементом которого является роликовая опора (рис. 54). На балансире 8, состоящем из двух щечек с ребрами, устанавливают опорные ролики 7. Для облегчения перемещения цинтрируемых труб опорные ролики снабжены шарикоподшипниками, посаженными на ось. В нижней части балансир имеет ось 6, которая расположена с некоторым смещением от центра тяжести системы и соединяет балансир с рамой. Балансир может качаться на оси и опускать один из роликов,

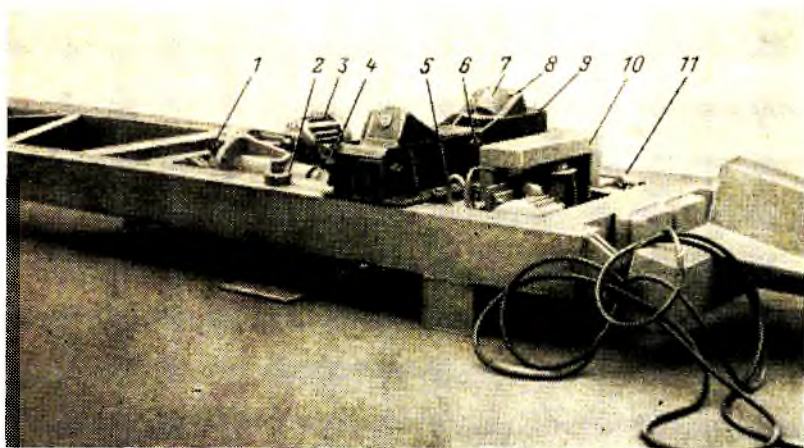


РИС. 54. ОПОРА И МАНИПУЛЯТОР ДЛЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ СМЕЩЕНИЯ ТРУБЫ ПРИ ЦЕНТРОВКЕ

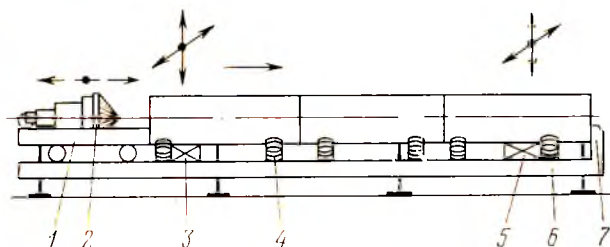


Рис. 55. СХЕМА СТЕНДА ДЛЯ СБОРКИ ТРУБ

обеспечивая сброс готовой секции. В рабочем положении балансир закрепляется защелкой, которая предотвращает произвольное перемещение рычага, штанги и упора в положение — сброс секции. Роликовые опоры устанавливают на раме 11, которая выставляется на поверхности с помощью винтовых домкратов 2. На рис. 55 изображена схема стенда ССТ-141. Для сборки одиночные трубы цепными отсекающими пода-

ются по покатам на ролики 4 рольганга 6, а затем тележкой 1 передвигаются в осевом направлении до упора 7. Совмещение осей, стенок труб и создание требуемого зазора более точно осуществляется двумя манипуляторами 3 и 5. Окончательная центровка труб проводится внутренним центратором 2, который устанавливается в трубах и совмещает образующие цилиндрических поверхностей. Каждый манипулятор (см. рис. 54) имеет механизмы для смещения трубы в горизонтальной плоскости 9 и подъема ее в вертикальной плоскости. Эти механизмы выполняют роль самоустанавливающихся опор, которые облегчают процесс центровки труб. Механизм смещения трубы представляет собой опору, перемещаемую между направляющими 5 с помощью рычага под действием штока 4. Перемещение штока осуществляется от редуктора 1, который имеет привод от электродвигателя 3. Подъем трубы при центровке осуществляется механическим подъемником 10.

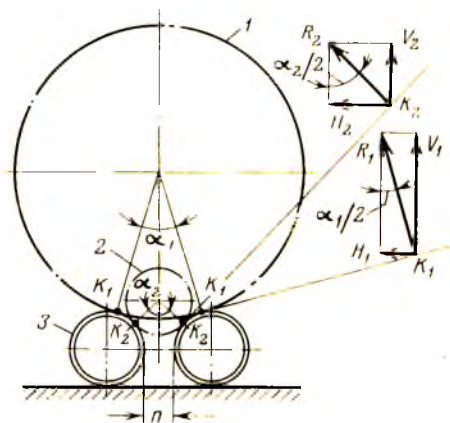


Рис. 56. СХЕМА ДЕЙСТВИЯ СИЛ ПРИ СБОРКЕ ТРУБ НА КОНДУКТОРЕ

Кондуктор из звеньев труб используют для центровки труб диаметром 219—720 мм в тех случаях, когда выполняют небольшой объем монтажных работ. Наиболее распространены кондукторы, состоящие из двух параллельных звеньев труб диаметром 325—529 мм. Эти звенья скрепляют между собой уголками или планками. Трубы в звене кондуктора сваривают между собой швом высотой 0,8 толщины стенки, что необходимо для нормальной центровки. Стыкуемые трубы, прошедшие подготовительные операции, накатывают на кондуктор так, чтобы между их концами было расстояние 50—100 мм и продольные швы находились в верхней части. Для осевого перемещения труб применяют лебедку или домкрат, которые устанавливают на специальной площадке с одного конца кондуктора. При определении расстояния между звеньями кондуктора (рис. 56) следует руководствоваться следующим. Расстояние  $n$  между трубами по ширине кондуктора определяют в зависимости от диаметра изделия таким образом, чтобы центральный угол  $\alpha_1$  (или  $\alpha_2$ ) составлял 45—90°. Для этого случая в точке касания  $K_1$  (или  $K_2$ ) центрируемой трубы (1 или 2) со звеньями кондуктора 3 вертикальная составляющая реакции  $V_1 = \frac{1}{2}G$ , где  $V_1$  (или  $V_2$ ) — вертикальная

составляющая опорной реакции  $R_1$  (или  $R_2$ );  $G$  — сила тяжести трубы. Горизонтальная составляющая  $H_1$  (или  $H_2$ ) стремится раздвинуть звенья труб, поэтому скрепляющие планки устанавливают с учетом этой силы

$$H_1 = V_1 \operatorname{tg} \alpha_1/2 = \frac{1}{2} G \operatorname{tg} \alpha_1/2.$$

Горизонтальная составляющая  $H_1$  (или  $H_2$ ) изменяется в зависимости от угла  $\alpha_1$  (или  $\alpha_2$ ).

Для подачи труб на кондуктор и съема секций после центровки используют стеллажи из труб, которые устанавливают перпендикулярно к кондуктору (рис. 57). Сборку труб на кондукторе часто проводят с поворотом их вокруг оси до полного

совмещения кромок, что связано с отклонением цилиндрической формы от идеальной. Осевой поворот трубы проводят вручную цепным ключом. Необходимое усилие для поворота трубы можно определить из выражения  $Pl \geq M_\tau$ , где  $P$  — усилие рабочего;  $l$  — длина рычага ключа;  $M_\tau$  — момент силы трения трубы

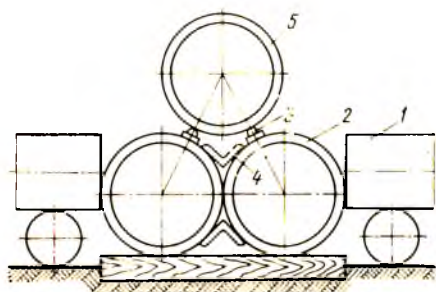


Рис. 57. СБОРОЧНЫЙ КОНДУКТОР.

1 — покаты; 2 — кондуктор из труб; 3 — шаровая опора; 4 — крепление труб кондуктора; 5 — центрируемая труба

$$M_\tau = GfR \left( 1 + \frac{1}{\sin(\alpha_1/2)} \right);$$

$f$  — коэффициент трения в местах контакта трубы с кондуктором, равный 0,18;  $R$  — радиус трубы.

Точная центровка на кондукторе обеспечивается применением наружных или внутренних центраторов. В местах расположения наружных центраторов в трубах кондуктора вырезают отверстия шириной 140—150 мм и длиной 1200—1400 мм, облегчающие доступ к стыку при центровке и сварке. Для создания осевого и кругового перемещения труб большого диаметра на кондукторе требуется прилагать значительные усилия. Для облегчения перемещения труб на кондукторах используют шаровые опоры, которые устанавливают с таким расчетом, чтобы на каждую трубу приходилось по четыре опоры (по две с каждой стороны кондуктора). Обойму шаровой опоры крепят к трубе на прямоугольной подкладке. В гнездо обоймы устанавливают стальной закаленный подшипниковый шар диаметром 35—40 мм, который прижимается крышкой с сальником при помощи винтов. Гнездо шара периодически заполняют консистентной смазкой. При работе шаровой опоры диаметром 40 мм допустимая предельная нагрузка на каждую опору не должна превышать 30 кН.

## ЦЕНТРАТОРЫ

Центратором называется устройство, позволяющее совмещать цилиндрические поверхности двух стыкуемых изделий (труб, секций из труб и т. п.) для выполнения сварочных работ. Центровка предусматривает закрепление отдельных труб или подобных изделий таким образом, чтобы они не имели сдвига и поворота относительно трех координатных осей. Это условие достигается за счет приложения радиальных сил, раздвигаемых силовым механизмом центратора. Для обеспечения устойчивого положения труб в центраторе необходимо, чтобы центры приложения радиальных сил (опоры) были расположены от стыка на значительном расстоянии, что уменьшит действие макрогеометрических погрешностей базовых поверхностей. В зависимости от положения центраторов при установке на базовую поверхность они бывают наружные или внутренние.

### Наружные центраторы

Наружные центраторы применяют при сборке труб в секции для сварки на полустационарных базах, а также при сборке труб или секций непосредственно в линию трубопровода. Наружный центратор представляет собой переносное монтажное устройство независимого действия. К этой группе центраторов можно отнести также и центрирующие устройства сварочных головок для прессовых методов сварки. Хотя конструктивное исполнение их различно, но они выполняют одну операцию по обеспечению соосности и совмещению торцовых кромок труб при сборке под сварку. Центратор состоит из опорных элементов, которые располагаются по окружности заборного устройства и силового механизма. Запорные устройства выполнены в виде накладных скоб, цепных звеньев, цилиндрических поверхностей и т. п. Силовой механизм, обеспечивающий усилие зажатия труб, необходимое для центровки, представляет собой механическое, гидравлическое или пневматическое устройство. Механические силовые механизмы выполняют в виде винтовых стяжек и распорок, эксцентриковых зажимов, а также рычажных систем. Гидравлический и пневматический силовые приводы могут состоять из цилиндра с поршнем или пневмокамеры с диафрагмой, которые закрепляют на несущем захвате, и источника энергии (насоса, компрессора, баллона со сжатым воздухом), который используют для работы привода. По конструкции наружные шарнирные центраторы делятся на две группы: жесткие одношарнирные и многозвенные.

*Эксцентриковый центратор* (рис. 58) состоит из двух или трех дуг рамочного типа 1, соединяемых между собой шарнирами. Поперечные планки, прокладками 2 соединяющие дуги, являются опорными элементами, которые плотно прижимаются к базовым поверхностям. Запорно-силовое устройство имеет

эксцентрик 3, который с помощью рукоятки 5 обеспечивает сжатие дуг с помощью тяг 4 и переключины 6. Усилие, развиваемое силовым механизмом, передается через поперечные планки с прокладками трубам. Стягивающее усилие  $Q$ , развиваемое эксцентриковым зажимом:

$$Q = \frac{Nl}{[1 + \sin(180 - \alpha + \varphi)]e},$$

где  $N$  — усилие рабочего;  $l$  — длина рукоятки;  $\alpha$  — максимальный угол поворота рукоятки;  $\varphi$  — угол трения покоя,  $\varphi = 8^\circ$ ;  $e$  — эксцентриситет.



Рис. 58. ЭКСЦЕНТРИКОВЫЙ ЦЕНТРАТОР

Для центраторов ЦНЭ силы действия всех опор на трубу равны между собой только в том случае, когда торец трубы имеет форму правильной окружности. В противном случае в корпусе центратора возникают изгибающий момент и растягивающие напряжения вдоль его дуг, которые и вызывают смещение кромок собираемых труб. Центраторы ЦНЭ имеют четыре типоразмера:

| Тип                 | Диаметр<br>трубы, мм | Масса<br>центратора, кг |
|---------------------|----------------------|-------------------------|
| ЦНЭ-8-15 . . . . .  | 89—159               | 7                       |
| ЦНЭ-16-21 . . . . . | 168—219              | 11,7—14,7               |
| ЦНЭ-27-32 . . . . . | 273—325              | 13,9—17,7               |
| ЦНЭ-37-42 . . . . . | 377—426              | 15,5—19,3               |

Центратор каждого типа можно использовать для сборки стыков труб не менее двух диаметров, применяя различные прокладки или устанавливая запасные дуги. Центровка считается законченной, когда смещение кромок не превышает допусти-



мых значений. В американской практике строительства магистральных трубопроводов эксцентриковые центраторы применяют для сборки труб диаметром 50—900 мм.

**Жесткий гидравлический центратор** (рис. 59) применяют при центровке труб в США. Центратор состоит из двух стальных полуколец 4, 5, соединенных между собой шарниром 3. Поперечные планки 2 на полукольцах являются опорными элементами. Запорно-силовое устройство состоит из накладного замка 1 с рукояткой 6 и гидравлической системы. Жесткие гидравлические центраторы применяют обычно для труб диаметром 400—1500 мм.

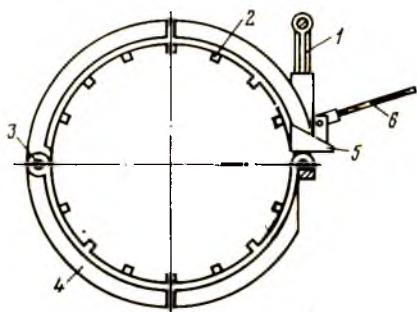


Рис. 59. ЖЕСТКИЙ ГИДРАВЛИЧЕСКИЙ ЦЕНТРАТОР

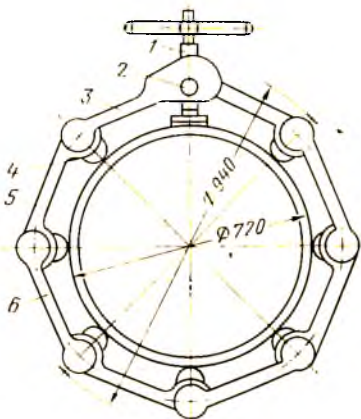


Рис. 60. МНОГОЗВЕННЫЙ ЦЕНТРАТОР

**Наружный многозвенный центратор** (рис. 60) состоит из нескольких наружных 6 и внутренних 5 звеньев, шарнирно соединенных между собой и образующих вместе с накладным замком 3 замкнутую цепь. На внутренних звеньях укреплены ролики 4, с помощью которых удерживаются трубы при центровке. Замыкающий шарнир имеет крестовину 2 и натяжной винт 1. При сборке раскрытую цепь центратора подводят под трубы, на цапфы крестовины надевают накладные замки. Во время центровки пластины цепи располагают симметрично по обеим сторонам от плоскости стыка. Затем цепь натягивают винтом 1 и ролики 4 совмещают кромки обеих труб. Усилие  $Q$ , развиваемое винтом с башмаком:

$$Q = Nl[0,1d + rf \operatorname{ctg}(\alpha/2)],$$

где  $N$  — усилие рабочего;  $l$  — длина рукоятки;  $d$  — наружный диаметр винта;  $r$  — радиус поверхности винта, передающий давление на башмак;  $f$  — коэффициент трения,  $f=0,16$ ;  $\alpha$  — угол конуса башмака,  $\alpha=118^\circ$ .



При работе многозвенного центратора в корпусе не возникает изгибающий момент, что позволяет при одном и том же номинальном диаметре изготавливать центратор менее массивный, чем эксцентрик или жесткий одношарнирный.

Конструкции и размеры цепных центраторов ЦЗ унифицированы:

| Тип              | Диаметр<br>трубы, мм | Масса<br>центратора, кг |
|------------------|----------------------|-------------------------|
| ЦЗ-51 . . . . .  | 529                  | 25                      |
| ЦЗ-61 . . . . .  | 630                  | 28                      |
| ЦЗ-71 . . . . .  | 720                  | 40                      |
| ЦЗ-81 . . . . .  | 820                  | 45                      |
| ЦЗ-91 . . . . .  | 920                  | 50                      |
| ЦЗ-101 . . . . . | 1020                 | 54                      |
| ЦЗ-121 . . . . . | 1220                 | 74                      |
| ЦЗ-142 . . . . . | 1420                 | 92                      |

### Внутренние центраторы

Внутренние, или распорные, центраторы обеспечивают наиболее качественную сборку труб благодаря более точному совпадению кромок труб. При центровке стык открыт снаружи, что позволяет вести сварку без предварительной прихватки. При достаточной мощности механизма центровки и высокой прочности его корпуса он может быть использован как расширитель, выравнивающий длину окружности концов. Применение внутренних центраторов позволяет повысить производительность и степень механизации сборки для сварки как поворотных, так и неповоротных стыков магистральных трубопроводов. Внутренние центраторы по конструкции механизма центрирующих устройств можно классифицировать на четыре группы: с механическим, гидравлическим, электромеханическим, пневматическим разжимными приводами. Выбор центрирующих устройств зависит от диаметра труб и системы энергоснабжения.

*Механический центратор* изображен на рис. 61. Он имеет широкое распространение в США для центровки труб диаметром 254—914 мм. Опорными элементами в этом центраторе являются разъемные башмаки, которые входят в соединяемые трубы. Башмаки выполнены в виде трех рамочных сегментов 3, соединенных шарнирами, благодаря чему они могут перемещаться и передавать усилие на стенки труб только одновременно. Средний сегмент является базой, на которой устанавливают червячный редуктор 4. Крайние сегменты прикреплены к концам среднего сегмента при помощи шарниров. Расходятся упорные башмаки при ходе резьбового штока, действующего на распорки 2, связанные шарнирно с верхними концами боковых сегментов. Управление разжимным домкратом и перемещение центратора осуществляются при помощи длинной штанги, вращаемой рабочим на расстоянии пристыковываемой к нитке трубы. Ролик 1 используют для перемещения центра-

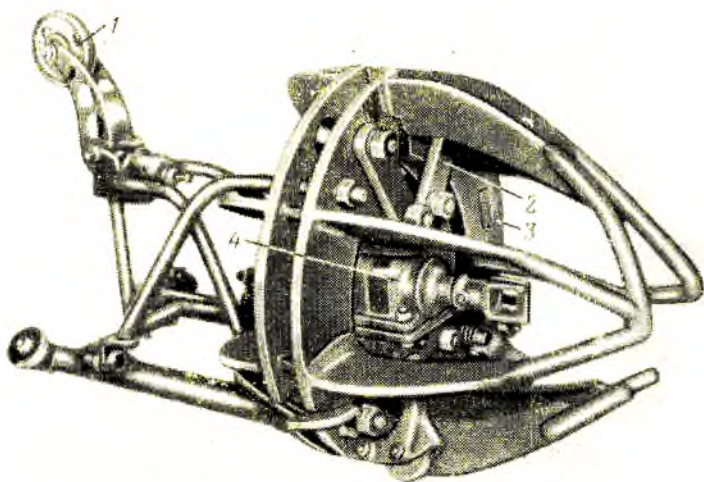


Рис. 61. МЕХАНИЧЕСКИЙ ЦЕНТРАТОР

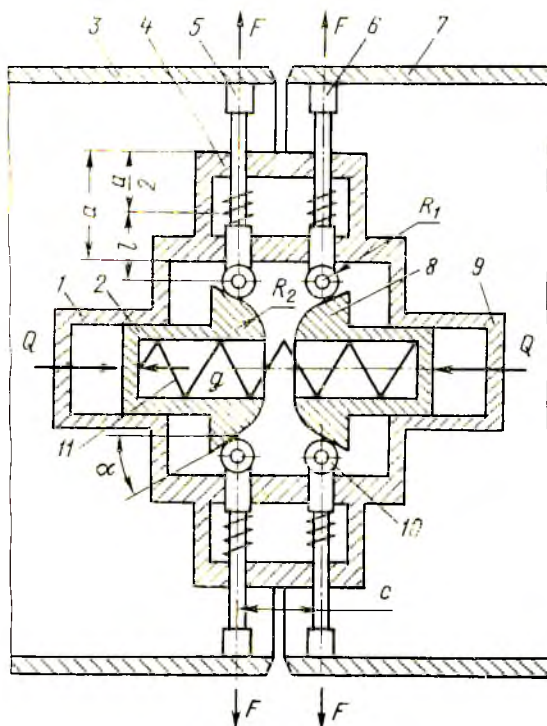


Рис. 62. СХЕМА ГИДРАВЛИЧЕСКОГО ЦЕНТРАТОРА

тора в трубе. Для некоторых центраторов этого типа вместо механического домкрата используется гидравлический.

*Гидравлический центратор* разработан в СКБ «Газстроймашина» и применяется для сборки стыков трубопроводов диаметром 325—1420 мм. Работа внутреннего гидравлического центратора основана на действии клинового зажима (рис. 62). Два конических клина (левый 2 и правый 8) устанавливают в жестком корпусе 4. Под действием давления масла, подаваемого в цилиндры 1 и 9, концы воздействуют через ролики 10 на два ряда независимых рычагов-жимков 5 и 6. На первом этапе центровки зажимается торец трубы 3 с помощью левого ряда рычагов-жимков 5. Затем устанавливают вторую трубу 7 с необходимым зазором и разжимают правый ряд рычагов-жимков 6. Таким образом, торцы приобретают форму, а трубы устанавливаются с требуемым положением осей в пространстве. После сварки корневого слоя шва масло сливается из полости цилиндров и клиновые зажимы под действием пружины 11 перемещаются в исходное положение, освобождая трубы от действия рычагов-жимков. Конические клиновые устройства имеют две разновидности: с многосконым клином и с конусом. В клиновом устройстве возникают значительные контактные напряжения между роликом и конусом, что ограничивает увеличение разжимного усилия. При расположении рычагов-жимков вокруг конуса общее усилие ряда на поверхность трубы

$$F = (Q - g) \frac{1 - \operatorname{tg}(\alpha + \varphi) \operatorname{tg} \varphi_{2n}}{\operatorname{tg}(\alpha + \varphi)},$$

где  $Q$  — усилие на штоке конического клина, создаваемое давлением масла в гидроцилиндре;  $g$  — разжимное усилие пружины;  $\alpha$  — угол скоса конического клина;  $\varphi$  — угол трения,  $\operatorname{tg} \varphi = f$ ;  $\varphi = \operatorname{arctg} f$ ;  $f$  — коэффициент трения скольжения;  $\operatorname{tg} \varphi_{2n}$  — приведенный угол трения рычагов-жимков,  $\operatorname{tg} \varphi_{2n} = (3l/a) \operatorname{tg} \varphi_2$ ;  $l$  — расстояние от центра шарнира до середины направляющей рычага;  $a$  — длина направляющей рычага;  $\operatorname{tg} \varphi_2$  — коэффициент трения скольжения двухопорного рычага. Усилие, оказываемое жимком на поверхность трубы,  $F_i = F/n$ , где  $n$  — число жимков в одном ряду центратора. Возникающие напряжения при контакте клина с роликом в общем случае можно выразить

$$\sigma_{\max} = \alpha_1 \sqrt[3]{4PA^2E^2},$$

где  $\alpha_1$  — коэффициент, зависящий от отношения  $A/B$  ( $A = 1/(2R_2)$ ,  $B = 1/(2R_1)$ ;  $R_2$  — радиус конуса в расчетном сечении;  $R_1$  — радиус ролика):

|                      |       |     |      |      |       |      |       |     |       |      |      |      |
|----------------------|-------|-----|------|------|-------|------|-------|-----|-------|------|------|------|
| $A/B$ . . . . .      | 1     | 0,9 | 0,8  | 0,7  | 0,6   | 0,5  | 0,4   | 0,3 | 0,2   | 0,15 | 0,1  | 0,05 |
| $\alpha_1$ . . . . . | 0,388 | 0,4 | 0,42 | 0,44 | 0,468 | 0,49 | 0,536 | 0,6 | 0,716 | 0,8  | 0,97 | 1,28 |

$P$  — нормальная сила на площадку контакта,  $P = F_i \cos \alpha$ ;  $\alpha$  — угол скоса клина (при  $\alpha < 10^\circ$  механизм обладает самоторможением);  $E$  — модуль упругости стали.

При линейном контакте (пара ролик — многоскожный клин) напряжения выражают формулой

$$\sigma_{\max} = 0,413 \sqrt{PE/(IR_1)}.$$

Для точечного контакта (ролик — конусный клин) напряжения имеют вид

$$\sigma_{\max} = \alpha_1 E \sqrt[3]{P/R_2^2}.$$

Максимальное усилие  $p'$ , развиваемое с помощью жимков на внутренней поверхности трубы, можно вычислить по формуле

$$p' = \frac{2\sigma_p \delta}{\beta D_v},$$

где  $\sigma_p$  — допускаемое кольцевое напряжение в сечении трубы;  $\delta$  — толщина стенки трубы;  $\beta$  — коэффициент перегрузки,  $\beta = 1,15$ ;  $D_v$  — внутренний диаметр трубы.

Допускаемое общее усилие жимков одного ряда центратора на поверхность трубы можно определить из выражения  $N_d \leq p' l_{жл} D_v k$ , где  $l_{жл}$  — длина жимка;  $k$  — коэффициент, учитывающий концентрацию напряжения от жимка,  $k = 0,7$ .

Расстояние между рядами жимков  $c = 0,45 (\sqrt{D_v \delta}) \div 0,88 \times (\sqrt{D_v \delta})$ .

Гидравлические центраторы (табл. 11) применяют для сборки стыков на полустационарных сварочных базах и в трассовых условиях на линии. СКБ «Газстроймашин» создало унифицированные гидравлические центраторы ЦВ=104, ЦВ=124 и ЦВ=144. Базовой моделью унифицированного ряда является

Таблица 11

ВНУТРЕННИЕ ГИДРАВЛИЧЕСКИЕ ЦЕНТРАТОРЫ

| Показатели                                   | ЦВ-32   | ЦВ-5Н  | ЦВ-61  | ЦВ-81   | ЦВ-92  | ЦВ-104 | ЦВ-124 | ЦВ-144 |
|----------------------------------------------|---------|--------|--------|---------|--------|--------|--------|--------|
| Диаметр стыкуемых труб, мм                   | 325—381 | 529    | 630    | 720—820 | 920    | 1020   | 1220   | 1420   |
| Общее усилие разжатия жимков одного ряда, кН | 400     | 410    | 410    | 600     | 600    | 800    | 800    | 800    |
| Число жимков в одном ряду                    | 6       | 6      | 6      | 9       | 12     | 12     | 16     | 16     |
| Время разжатия, сжатия жимков, с             | 2/4     | 5/2    | 5/2    | 7/4     | 9/7    | 12/10  | 12/10  | 12/10  |
| Размеры, мм                                  |         |        |        |         |        |        |        |        |
| длина (без штанги)                           | 2000    | 1700   | 1700   | 2400    | 2600   | 3200   | 3260   | 3260   |
| диаметр                                      | 380     | 500    | 600    | 800     | 900    | 1000   | 1200   | 1400   |
| длина штанги                                 | 37 000  | 37 000 | 37 000 | 37 000  | 37 000 | 37 000 | 37 000 | 37 000 |
| Масса, кг:                                   |         |        |        |         |        |        |        |        |
| центратора без штанги                        | 260     | 290    | 350    | 800     | 940    | 1460   | 1670   | 1910   |
| штанги                                       | 95      | 95     | 95     | 95      | 95     | 95     | 95     | 95     |

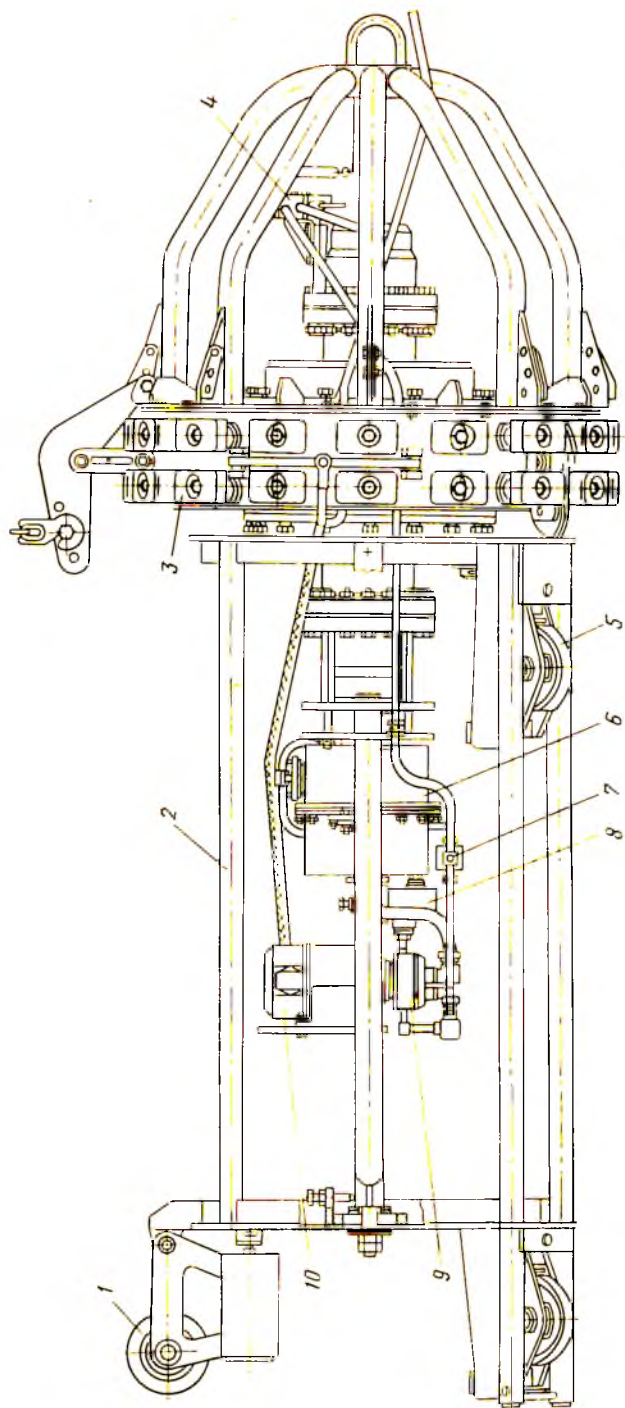


Рис. 63. ВНУТРЕННИЙ ЦЕНТРАТОР ЦВ-124



центратор ЦВ=124. Центраторы ЦВ=104 и ЦВ=144 унифицированы с базовой моделью более чем на 90 %, включая гидроривод, блоки гидроцилиндров, механизм управления, блоки колес, штанга и др. Внутренний центратор ЦВ=124 (рис. 63)

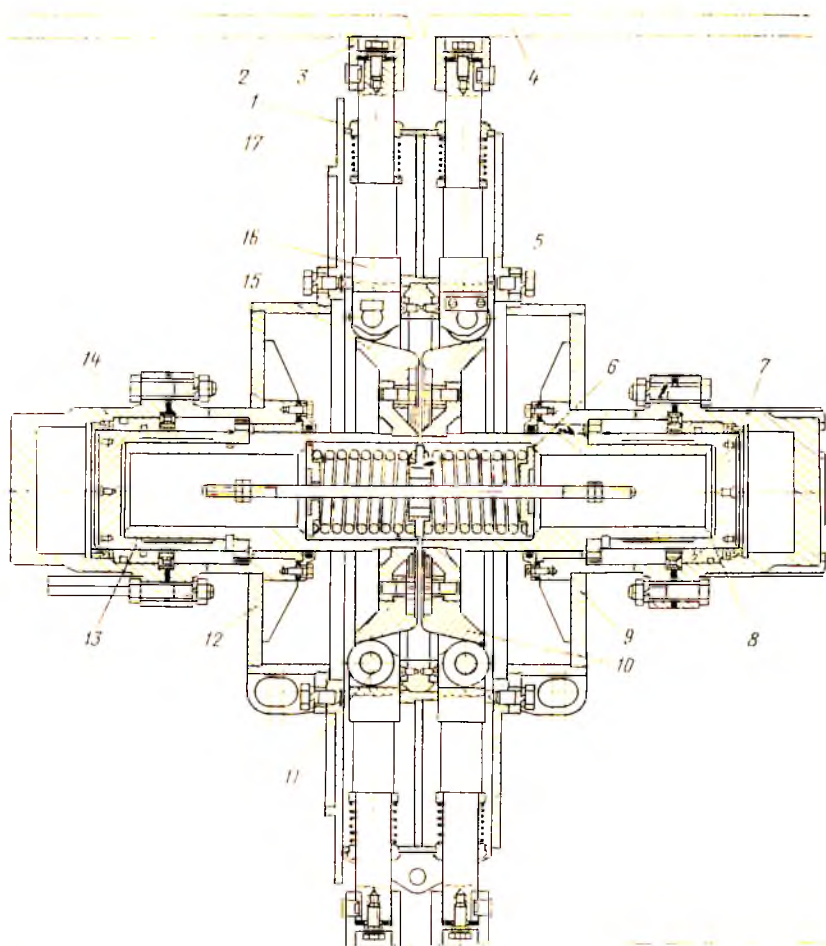


Рис. 64. ЦЕНТРИРУЮЩИЙ МЕХАНИЗМ ЦЕНТРАТОРА ЦВ-124

состоит из центрирующего механизма 3 и рамы 2, собранной из труб. Для равновесия центратора при движении на раме устанавливается три ролика 1, которые удерживают центрирующий механизм от опрокидывания, так как центр тяжести располагается между опорными роликами 5. На раме установлен электродвигатель постоянного тока 10, который приводит во

вращение радиально-поршневой насос 9 марки 465K. Масло из бака 6 через предохранительный клапан 8 подается насосом под давлением 15 МПа в гидросистему, проходя через обратный клапан 7 в левый цилиндр. Работа центрирующего механизма осуществляется гидрораспределителем 4. Перемещение центратора от стыка к стыку осуществляется при помощи штанги, в которой установлен трос для управления гидрораспределителем центратора.

Центрирующий механизм (рис. 64) представляет собой сварной корпус 1, закрытый крышками 9, 12. Крышки выполняют роль несущих конструкций, которые удерживают цилиндры 7 и 14, а также штоки 8 и 13 со съемными коническими клиньями 10 и 15. Трубы зажимаются радиально расположенными рычагами-жимками 5 и 16, снабженными возвратными пружинами 17. Для уменьшения потерь от трения рычагов-жимков о клинья они снабжены роликами 11, а их концы, передающие усилие на торцы труб 2 и 4, имеют жимки с роликами 3. Работа центратора ЦВ-124 складывается из трех циклов.

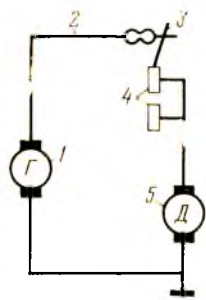


Рис. 65. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА ПИТАНИЯ ЦЕНТРАТОРА ЦВ-124

Первый цикл. Масло от насоса подается в левый цилиндр 14 (при закрытом клапане гидрораспределителя). Шток 13 с клином 15 перемещается влево и раздвигает жимки 16, обеспечивая зажатие трубы 2.

Второй цикл. Масло от гидрораспределителя подается в правый цилиндр 7. Шток 8 с клином 10 начинает перемещаться влево и разжимает рычаги-жимки 5 второго ряда.

Третий цикл. При открытии запорных устройств с помощью троса, который укрепляется на конце штанги, происходит слив масла из цилиндров в бак. Штоки под действием пружины 6 расходятся, и рычаги-жимки возвращаются в исходное положение.

Электрическая схема внутреннего центратора ЦВ=124 (рис. 65) состоит из генератора 1, электродвигателя 5 постоянного тока мощностью 5 кВт с номинальным напряжением 40 В, токоподводящих кабелей 2 марки ПРГД сечением 50 мм<sup>2</sup>, электрода 3 и контактных пластин 4. В качестве генератора используют сварочный агрегат АДД-502 или АСП-500Г. Электродвигатель центратора соединяется одной клеммой с массой центратора, а другой — с двумя контактными пластинами, которые устанавливают на центраторе в месте стыка. Сборку неповоротных стыков трубопроводов на трассе при помощи внутреннего центратора выполняют в следующей последовательности. При помощи трубоукладчика центратор устанавливают в трубе так, чтобы левый ряд жимков находился на расстоянии 15—20 мм

от торца. Для зажатия левого ряда жимков производится пуск электродвигателя и насоса при помощи касания электродов 3 контактной пластины 4. Затем с помощью трубоукладчика подают очередную трубу или секцию, пропуская через них штангу и обеспечивая требуемый сварочный зазор. Зажатие правого ряда жимков производится дистанционным переключением гидравлических запорных устройств, а пуск электродвигателя осуществляется прикосновением электрода к пластине. В результате происходит жесткая фиксация стыка центратором для производства сварочных работ. После завершения сварки первого шва жимки опускаются и центратор перемещается к торцу трубы с помощью трубоукладчика, который вытягивает центратор за штангу. В процессе наращивания нитки трубопровода технологический цикл сборки стыков повторяется.

*Электромеханический внутренний центратор* разработан Киевским филиалом СКБ «Газстроймашина» для сборки стыков трубопроводов диаметром 1220—1420 мм. Этот центратор обладает той особенностью, что может обеспечить значительные разжимные усилия при меньшей массе самого центрирующего устройства. Электромеханический центратор (рис. 66) состоит из следующих основных узлов: центрирующего механизма, силового привода и рамы. Трубы 8 и 9 зажимаются жимками 10 (16 жимков) под действием рычагов 11. Разжимное усилие 1,6 МН создается с помощью электродвигателя 4 мощностью 2,5 кВт, который передает вращающий момент на редуктор 5 и через муфту на винт 13. Винт имеет правую и левую резьбу, что обеспечивает сближение резьбовых муфт 7 и 12 при зажатии труб. Для удержания центратора 5 от опрокидывания на раме 2 устанавливаются три задних колеса 1 и пять передних 14. Электродвигатель работает на постоянном токе напряжением 30 В. Управление мотором осуществляется из шкафа 3, а также концевым выключателем 6. Разжимное усилие, действующее на каждые два противоположных жимка, лежащих в одной плоскости:

$$Q = 2P/\operatorname{tg}(\alpha + \beta),$$

где  $P$  — усилие, развиваемое одной резьбовой муфтой;  $\alpha$  — угол наклона рычага,  $\alpha = 5 \div 10^\circ$ ;  $\beta$  — дополнительный угол наклона, с помощью которого учитываются потери на трение в шарнирах,  $\beta = \arcsin f d/L$ ;  $f$  — коэффициент трения в шарнире;  $d$  — диаметр шарнира;  $L$  — расстояние между отверстиями рычага.

Внутренние центраторы имеют значительные размеры и массу, поэтому при центровке труб большого диаметра для перемещения центраторов на трассе часто требуется использовать трубоукладчики. Для повышения механизации сборочных операций применяют самоходные устройства, обеспечивающие перемещение центраторов.

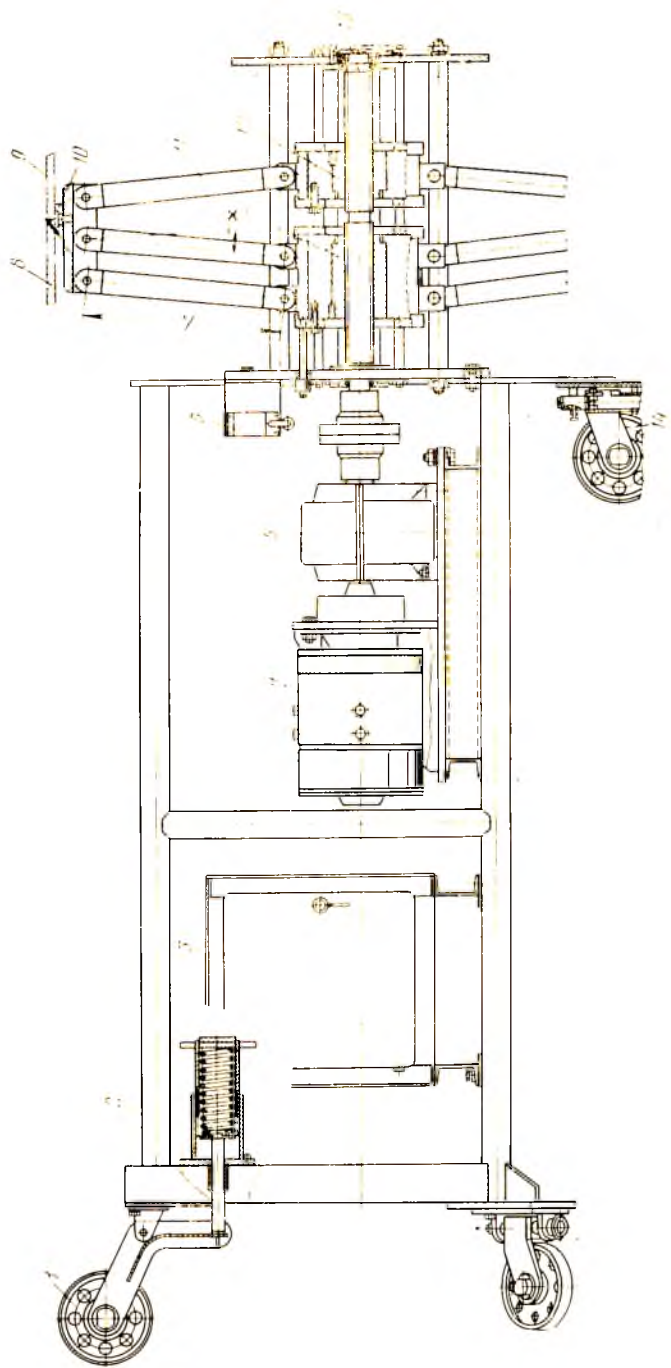


Рис. 66. ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКИЙ ЦЕНТРАТОР ЦВМ-141

стыков, где использовать автоматы или полуавтоматы затруднительно из-за небольшой протяженности стыка или ограниченного пространства для расположения сварочных установок. При разработке технологии ручной сварки обычно выбирают: вид подготовки кромок, тип шва, род и силу тока, тип электродов, скорость сварки, последовательность наложения швов.

Тип электродов выбирают исходя из необходимости получения механических свойств металла шва, равных свойствам основного металла при высокой производительности процесса. Выбранный электрод должен создать требуемый провар внутренних кромок изделия, обеспечивая удержание металла от стекания во всех пространственных положениях в сочетании с плавным очертанием внешней поверхности валика шва. Диаметр электрода выбирают в зависимости от толщины металла при сварке швов стыковых соединений и от катета шва при сварке угловых и тавровых соединений:

|                                                              |       |   |     |      |       |       |      |
|--------------------------------------------------------------|-------|---|-----|------|-------|-------|------|
| Толщина металла при сварке в стык, мм . . .                  | 1,5—2 | 3 | 4—8 | 9—12 | 13—15 | 16—19 | 20   |
| Диаметр электрода, мм . . .                                  | 1,6—2 | 3 | 4   | 4—5  | 5     | 5—6   | 6—10 |
| Катет шва при сварке угловых и тавровых соединений, мм . . . | 3     |   | 4—5 | 6—9  |       |       |      |
| Диаметр электрода, мм . . .                                  | 3     |   | 4   | 5    |       |       |      |

При сварке многопроходных стыковых соединений трубопроводов, сферических резервуаров корневой шов обычно выполняют электродами диаметром 3—4 мм с тем, чтобы улучшить провар корня шва.

При сварке угловых и тавровых соединений резервуарных конструкций, как правило, за один проход выполняют швы с катетом не более 8—9 мм. Для выполнения швов с большим катетом применяют сварку за два прохода и более.

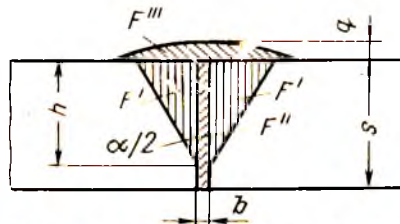


Рис. 67. ФОРМА СТЫКОВОГО ШВА С V-ОБРАЗНОЙ РАЗДЕЛКОЙ

При сварке стыковых соединений площадь поперечного сечения металла, наплавленного за один проход, при которой обеспечиваются оптимальные условия формирования, должна составлять для первого прохода (при проварке корня шва)  $F_1 = (6 \div 8)d_3$ , для последующих проходов  $F_n = (8 \div 12)d_3$ , где  $d_3$  — диаметр электрода. При сварке угловых и тавровых соединений резервуарных конструкций общая площадь поперечного сечения наплавленного металла  $F_n = K_y k^2 / 2$ , где  $K_y$  — коэффициент, учитывающий наличие зазоров и выпуклость (усиление) шва;  $k$  — катет шва. Значение  $K_y$  выбирают в зависимости от катета шва:

|                    |     |      |      |       |       |      |
|--------------------|-----|------|------|-------|-------|------|
| $k$ , мм . . . . . | 3—4 | 5—6  | 7—10 | 12—20 | 20—30 | 30   |
| $K_y$ . . . . .    | 1,5 | 1,35 | 1,25 | 1,15  | 1,10  | 1,05 |

Для определения числа проходов в стыковых швах с разделкой кромок учитывают общую площадь поперечного сечения наплавленного металла (рис. 67):

$$F_{\Pi} = 2F' + F'' + F''' \text{ или } F_{\Pi} = h^2 \operatorname{tg}(\alpha/2) + bs + \frac{2}{3} q [2h \operatorname{tg}(\alpha/2) + b + 6l].$$

Число проходов определяют, учитывая общую площадь поперечного сечения наплавленного металла при первом и каждым последующем проходах:  $n = (F_{\Pi} - F_1)/F_{\Pi} + 1$ .

Сварочный ток при ручной дуговой сварке  $I_{\text{св}} = \pi d_3^2 j / 4$ , где  $d_3$  — диаметр электрода;  $j$  — допустимая плотность тока (табл. 12).

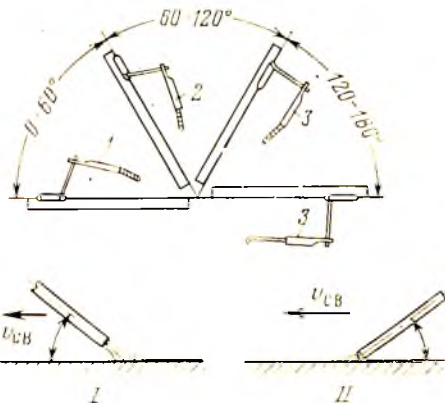


Рис. 68. ПОЛОЖЕНИЕ ШВОВ В ПРОСТРАНСТВЕ (НИЖНЕЕ 1, ВЕРТИКАЛЬНОЕ 2, ПОТОЛОЧНОЕ 3) И СПОСОБЫ ВЫПОЛНЕНИЯ ШВОВ (СВАРКА УГЛОМ НАЗАД I И УГЛОМ ВПЕРЕД II) ПРИ РУЧНОЙ СВАРКЕ

Таблица 12

ДОПУСТИМАЯ ПЛОТНОСТЬ ТОКА ПРИ РУЧНОЙ  
ДУГОВОЙ СВАРКЕ (в А/мм<sup>2</sup>)

| Покрытие                     | $d_3$ , мм |           |          |          |
|------------------------------|------------|-----------|----------|----------|
|                              | 3          | 4         | 5        | 6        |
| Рудно-кислос, рутило-<br>вое | 14—20      | 11,5—16   | 10—13,5  | 9,5—12,5 |
| Фтористо-кальциевое          | 13—18,5    | 10—14,5   | 9—12,5   | 8,5—12   |
| Целлюлозное                  | 11,3—15,5  | 11,1—14,3 | 9,1—12,7 | 7—7,7    |

Для приближенных расчетов сварочный ток определяют по одной из следующих формул:

$$I_{\text{св}} = K_1 d_3^{1,5}; \quad I_{\text{св}} = d_3 (K_2 + \alpha d_3),$$

где  $K_1 = 20 \div 25$ ;  $K_2 = 20$ ;  $\alpha = 6$  — коэффициенты, найденные опытным путем.

При сварке в вертикальном и потолочном положениях ток уменьшают на 15—20 % по сравнению с током при сварке в нижнем положении (рис. 68) для предотвращения стекания



жидкого металла. Проплавление основного металла при сварке в стык изменяется по глубине на 1,5—4 мм, швы при ручной сварке образуются на 60—75 % за счет наплавленного металла. Ширина стыкового и катет углового швов зависят от диаметра электрода и амплитуды поперечных колебаний конца электрода. Напряжение дуги при ручной сварке изменяется в сравнительно узких пределах и его выбирают по паспорту для данной марки электрода.

Для определения теплового воздействия на свариваемый металл находят погонную энергию дуги

$$q_{\text{п}} = q/v_{\text{св}} = I_{\text{св}} U_{\text{д}} \eta_{\text{п}} / v_{\text{св}}, \quad (21)$$

где  $q$  — эффективная тепловая мощность дуги;  $U_{\text{д}}$  — напряжение дуги;  $\eta_{\text{п}}$  — эффективный к. п. д. дуги;  $v_{\text{св}}$  — скорость сварки

$$v_{\text{св}} = \alpha_{\text{п}} I_{\text{св}} / (3600 \rho F_{\text{п}});$$

$\alpha_{\text{п}}$  — коэффициент наплавки;  $\rho$  — плотность наплавленного металла;  $F_{\text{п}}$  — площадь поперечного сечения наплавленного металла за данный проход.

Скорость ручной дуговой сварки обычно задают и учитывают косвенно по необходимым размерам получаемого шва. При разработке технологического процесса сварки, исходя из условия получения минимальных деформаций сварных конструкций, возникает необходимость оценки погонной энергии в зависимости от размеров шва. Подставляя значение  $v_{\text{св}}$  в выражение (21) и обозначая постоянные величины коэффициентом  $A$ , находим, что погонная энергия будет пропорциональна площади поперечного сечения наплавленного металла:  $q_{\text{п}} = A F_{\text{п}}$ . Для электродов различных марок среднее значение коэффициента  $A = 14500$  и для приближенных расчетов можно пользоваться формулой  $q_{\text{п}} = 14500 F_{\text{п}}$ .

В зависимости от толщины свариваемого металла и формы подготовки кромок (рис. 69) швы могут быть выполнены однопроводными, многопроводными слоями или многопроводными валиками. При сварке магистральных трубопроводов и резервуарных конструкций швы выполняют многопроводными слоями.

### ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ И ТЕХНИКИ СВАРКИ НЕПОВОРОТНЫХ СТЫКОВ ТРУБОПРОВОДОВ

Монтаж и сварку неповоротных стыков трубопроводов выполняют в основном четырьмя методами.

*Первый метод* используют при небольших объемах работ и малых диаметрах труб (325—529 мм). Нитку трубопровода наращивают из отдельных труб или секций с выполнением всех слоев шва одним сварщиком. Каждый сварщик выполняет сварку собранного и прихваченного стыка от начала до конца в разных пространственных положениях. В этом случае сварку

первого слоя шва выполняют снизу вверх электродами с основным покрытием (например УОНИ-13/55) диаметром 2,5—3,25 мм сначала с одной стороны стыка, а затем с другой (рис. 70, а). После зачистки корневого слоя от шлака аналогично сваривают второй и последующие слои подобными электродами диаметром 4 и 5 мм. Существенным недостатком этого метода сварки является низкая производительность, которая обусловлена применением электродов одного типа, необходимостью перехода с одной стороны стыка на другую, а также перетаскиванием сварочного кабеля и инструмента. От сварщика требуется высокая квалификация и универсальность.

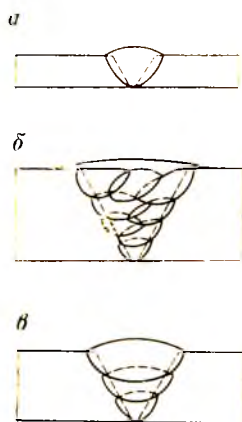
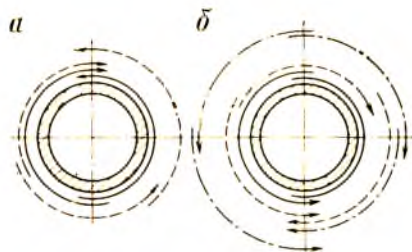


Рис. 69. ФОРМИРОВАНИЕ ОДНОПРОХОДНОГО ШВА (а), МНОГОПРОХОДНОГО ШВА ВАЛИКАМИ (б) И СЛОЯМИ (в)

Рис. 70. ПОРЯДОК РУЧНОЙ СВАРКИ НЕПОВОРОТНЫХ СТЫКОВ ТРУБОПРОВОДОВ



Второй метод применяют при больших объемах работ и сварке трубопроводов значительных диаметров. Обычно одна пара сварщиков работает со сборщиками на сборке и сварке корневого слоя шва, а остальные две пары или тройки сварщиков сваривают каждая свою часть стыка до конца, начиная со второго слоя. В данном случае каждый сварщик сваривает третью часть окружности (рис. 70,б), выполняя слой шва снизу вверх электродами с основным покрытием или сверху вниз электродами с целлюлозным покрытием (например, ВСЦ-4А). Электроды с целлюлозным покрытием применяют для первого (корневого) слоя и второго («горячего») прохода. Термин «горячий» показывает на необходимость минимального времени простоя (менее 5 мин) между сваркой первого и второго слоя.

Третий метод сборки и сварки неповоротных стыков трубопроводов (поточно-групповой) применяют при очень больших объемах работ. Поточно-групповой метод с использованием электродов с целлюлозным покрытием широко распространен в зарубежной практике строительства магистральных трубопроводов. В отечественном трубопроводном строительстве этот

метод часто применяют в сочетании со вторым методом и использованием электродов с основным покрытием. Процесс сборки и сварки неповоротных стыков труб при поточно-групповом методе проводится последовательно в несколько этапов. На первом этапе подготовительное звено разгружает секции труб с плетевозов и укладывает их вдоль бровки траншеи, очищает полости секций труб от наледи, земли, снега, посторонних предметов. При необходимости правят вмятины и обрезают торцы труб. Зачищают кромки труб шлифовальными машинками или резцами и собирают стыки с помощью центраторов, обеспечивая необходимый зазор между кромками для сварки.

На втором этапе в зависимости от принятого варианта поточно-группового метода организации сварочно-монтажных работ выполняют предварительный подогрев и сварку корневого слоя шва или накладывают прихватки длиной 80—100 мм на расстоянии 300—380 мм один от другого. Сварку корневого слоя шва выполняют электродами с целлюлозным покрытием (ВСЦ-4А) в направлении сверху вниз четыре сварщика (трубы диаметром 1420 мм). Затем выполняют сварку «горячего» прохода те же четыре сварщика, которые выполнили корневой слой. Марку электродов выбирают в соответствии с техническими условиями, принимая во внимание марки стали труб. Электроды с целлюлозным покрытием широко применяют как в отечественном, так и в зарубежном трубопроводном строительстве для выполнения корневого слоя шва и «горячего прохода». Применение электродов с целлюлозным покрытием исключает необходимость подварки корня шва внутри трубы. Сварку выполняют методом опирания на кромки труб с усилием 50—80 Н без колебательных движений. При сварке труб диаметром 1000 мм корневой слой и «горячий проход» выполняют два сварщика на верхней полуокружности трубы с лестниц-стремянкой, а два сварщика — на нижней полуокружности трубы. Угол наклона электрода в сторону движения составляет 40—90°, что обеспечивает гарантированный провар корня шва. При работе электродами с целлюлозной обмазкой необходимо тщательно следить за режимом сварки, так как при чрезмерном увеличении сварочного тока может произойти обугливание покрытия, что ухудшит газовую защиту наплавленного металла и приведет к образованию дефектов в шве. Скорость сварки выдерживают 16—22 м/ч. При меньшей скорости сварки нарушается нормальное формирование обратного валика шва и возможно образование пор. Превышение скорости сварки приводит к несплавлению кромок. Корневой слой шва обычно выполняют электродами диаметром 2,5 мм (для труб диаметром до 300 мм) и 3,25 мм — для труб большего диаметра. Смещение кромок не должно превышать 1,5 мм, чтобы избежать ослабления шва при последующей шлифовке. После сварки корневого слоя шва поверхность валика тщательно очищают абразивным

кругом с помощью высокооборотной машинки. После этого конец секции опускают на опору и трубоукладчик идет за новой секцией. Центратор перемещают на позицию центровки.

На третьем этапе проводят сварку третьего и других заполняющих слоев (в зависимости от толщины стенки трубы). В этом случае одновременно могут работать на стыке два, три или четыре сварщика, общее число которых зависит от темпа прокладки трубопровода. При сварке труб диаметром 1020—1420 мм наибольший эффект достигается при работе трех или четырех сварщиков, что позволяет сократить фронт работ вдоль трассы трубопровода. Для сварки применяют электроды с основным покрытием, начиная работу с нижней точки и кончая в верхней части стыка.

На четвертом этапе выполняют облицовочный слой несколько сварщиков подобно сварке заполняющих слоев.

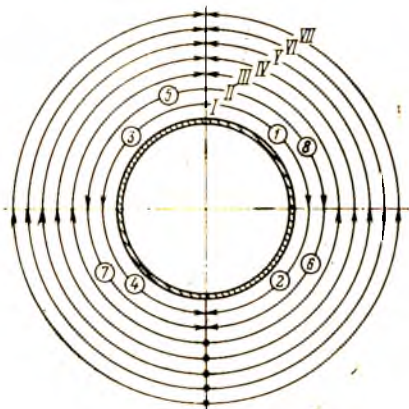


Рис. 71. ПОРЯДОК НАЛОЖЕНИЯ СЛОЕВ ШВА ПРИ ПОТОЧНО-РАСЧЛЕНЕННОМ МЕТОДЕ РАБОТЫ (ДИАМЕТР ТРУБ 1420 мм):

I — VII — слои шва; 1—8 — расположение сварщиков

Сварку заполняющих и облицовочного слоев шва осуществляют электродами с основным покрытием (например, ВСФ-60) диаметром 4 мм. Для увеличения производительности в верхней полуокружности трубы целесообразно использовать электроды диаметром 5 мм. Сварку необходимо вести с меньшей длиной дуги, что предохраняет от возникновения пор в потолочном и вертикальном положениях. Электроды с основным покрытием образуют на поверхности швов трудноудаляемый шлак, который снимают с помощью пневмозубил или шлифовальных машинок с последующей зачисткой металлическими щетками.

Четвертый метод сборки и сварки стыков магистральных трубопроводов (поточно-расчлененный) применяют в нашей стране и за рубежом. Поточно-расчлененный метод сварки предусматривает специализацию одного звена сварщиков по выполнению корневого слоя шва электродами с целлюлозным покрытием и другого звена сварщиков, выполняющих «горячий» проход электродами с тем же покрытием (рис. 71). Дальнейшие операции выполняют в той же последовательности, что и при поточно-групповом методе. Для поточно-расчлененного метода характерно, что каждый сварщик выполняет определенный участок шва без регулирования режима.

## СВАРКА ТРУБОПРОВОДОВ ИЗ СТАЛЕЙ ПОВЫШЕННОЙ И ВЫСОКОЙ ПРОЧНОСТИ

В отечественной и зарубежной практике трубопроводного строительства и резервуаростроения все чаще применяют стали с пределом прочности 550—750 МПа, что способствует уменьшению металлоемкости конструкций. Применение микродобавок ванадия, ниобия и титана позволило значительно повысить механические свойства стали за счет выделения карбидных и карбонитридных фаз. Эти стали (14Г2АФ, 15ГСТЮ, 16Г2АФ,

16Г2САФ, 17Г2АФ и т. п.) более склонны к росту зерна в околосварочной зоне, а при высоких скоростях охлаждения в них появляются неравновесные структуры закалочного характера и холодные трещины. При разработке технологии сварки сталей повышенной и высокой прочности рассчитывают тепловой режим, при котором предотвращается образование мартенсита и закалочных трещин; выбирают сварочные материалы, обеспечивающие высокую технологическую прочность наплавленного металла и равнопрочность его с основным металлом. Эти вопросы обычно рассматривают в следующей последовательности. Проводят расчеты режима сварки по условиям проплавления,

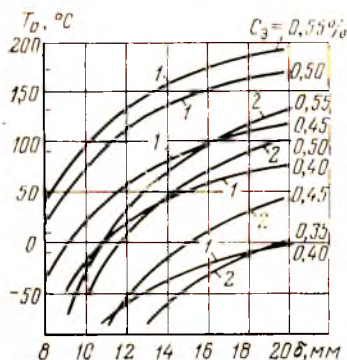


Рис. 72. ЗАВИСИМОСТЬ МИНИМАЛЬНО ДОПУСТИМОЙ НАЧАЛЬНОЙ ТЕМПЕРАТУРЫ  $T_0$  ОТ ТОЛЩИНЫ МЕТАЛЛА  $\delta$  И ЭКВИВАЛЕНТА УГЛЕРОДА  $C_3$

1, 2 — для электродов соответственно с целлюлозным и основным покрытием

которые не отличаются от аналогичных расчетов при сварке незакаливающихся сталей. Пользуясь диаграммами термокинетического или изотермического распада аустенита для принятой стали, определяют допустимую скорость охлаждения металла при сварке. Для этого рассчитывают критическую скорость охлаждения. Найденную скорость сравнивают с мгновенной скоростью охлаждения, полученной по формулам. При этом стремятся получить перлитную структуру.

Требуемый тепловой режим сварки можно обеспечить соответствующим установлением погонной энергии процесса  $q/v_{св}$  или введением в технологический процесс подогрева металла перед сваркой или в процессе сварки. Возможность выбора погонной энергии процесса в значительной степени зависит от способа сварки. Для ручной сварки она может быть в пределах 4—40 кДж/см, а для автоматической сварки под флюсом — 16—100 кДж/см. Применение режимов с большими погонными



энергиями предотвращает закалку, но приводит к чрезмерному перегреву основного металла в околошовной зоне, что неприемлемо для этих сталей. При сварке корневого слоя шва стыков трубопроводов электродами с основным покрытием (ВСФ-65) диаметром 3—3,25 мм погонная энергия составляет 10 кДж/см, а при сварке электродами с целлюлозным покрытием диаметром 4 мм (марка ВСЦ и ВСФС-50) — 6 кДж/см. В этом слу-

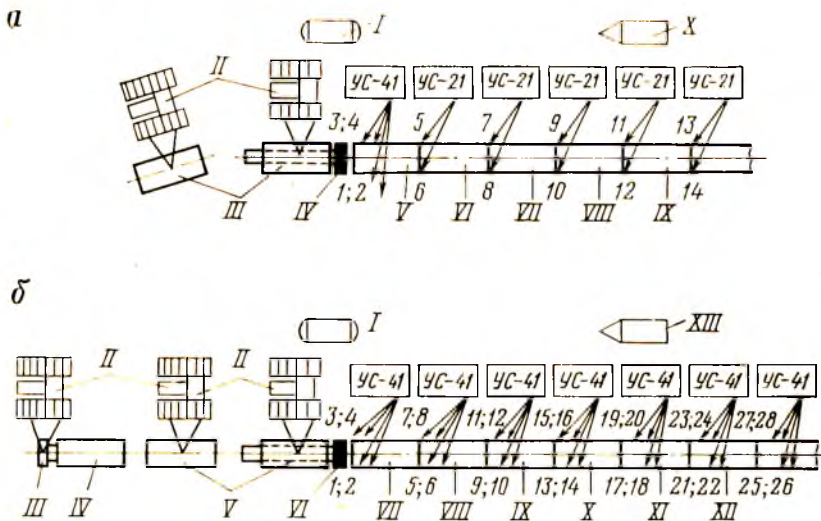


Рис. 73. СХЕМА РАСПОЛОЖЕНИЯ РАБОЧИХ МЕСТ СВАРЩИКОВ И ОБОРУДОВАНИЯ ПРИ ПОТОЧНО-ГРУППОВОМ МЕТОДЕ СВАРКИ НЕПОВОРОТНЫХ СТЫКОВ:

а — сварка стыков с использованием электродов с целлюлозным и основным покрытием; I — подогреватель стыков; II — трубоукладчики; III — пристыковываемые секции; IV — центратор; V—IX — свариваемые секции; X — полевой вагончик; УС-41 — самоходная четырехпостовая установка; УС-21 — самоходная двухпостовая установка; 1—14 — рабочие места сварщиков; б — сварка стыков с использованием электродов с целлюлозным покрытием; I — подогреватель стыков; II — трубоукладчики; III — станок для механической обработки кромок СПК-141; IV — обработка кромок перед сваркой; V — пристыковываемые секции; VI — центратор; VII—XII — свариваемые секции; XIII — полевой вагончик с электростанцией; УС-41 — самоходная четырехпостовая установка; 1—28 — рабочие места сварщиков

чае минимальную температуру стыка и критическую скорость охлаждения можно установить из рассмотрения (рис. 72). Здесь эквивалентный углерод  $C_{\text{э}}$  (в %) определен по формуле МИС (см. гл. 6).

На образование закалочных трещин отрицательную роль играет растворенный в металле водород, причем тем более сильную, чем больше эквивалент углерода свариваемой стали. Поэтому при выборе электродов для сварки корневого слоя шва это положение необходимо учитывать. При сварке корневого слоя шва электродами с целлюлозным покрытием (ВСЦ-4А) содержание водорода в металле шва достигает 12 см<sup>3</sup>/100 г, а при сварке первого слоя электродами с основным покрытием



(УОНИ-13/55) — 5 см<sup>3</sup>/100 г. Применение электродов с целлюлозным покрытием позволяет увеличить темп прокладки трубопроводов за счет высокой линейной скорости сварки (до 22 м/ч) и обеспечить гарантированное проплавление корня шва с образованием обратного валика, что исключает необходимость подварки корня шва внутри трубы. При сварке электродами с целлюлозным покрытием предъявляют более жесткие требования к температурному режиму монтажного стыка до начала и в процессе работы, к шлифовке металла корневого слоя шва, а также к технике выполнения второго слоя шва.

Рассмотрим технологию ручной сварки неповоротных стыков труб диаметром 1420 мм с толщиной стенки 17,5 мм (рис. 73), изготовленных из стали повышенной прочности.

Для достижения высокой производительности труда и высокого темпа технологического передвижения сборочно-сварочной бригады применяют поточно-групповой или поточно-расчлененный метод организации сварочно-монтажных работ.

### Технологический процесс сборки и сварки

На трассу доставляют секции труб (см. рис. 73, а), которые укладывают на расстоянии 1,5 м от бровки траншеи под углом 15—20° к проектной оси. Перед сборкой проводят очистку внутренней полости секции от загрязнений и зачистку кромок шлифовальной машинкой. Далее центрируют секции внутренним центратором ЦВ-144 с зазором 1,5—2,5 мм (для электродов с целлюлозным покрытием), который контролируют универсальным шаблоном. Наиболее рационально использовать самоходные центраторы (подобно ЦВ-123). После центровки стыки подогревают кольцевыми наружными горелками (рис. 74) подогревателей типа ПС-1424 до необходимой температуры (не выше 200 °С), контролируемой термокарандашами или термометрами ТП-1. Операцию подогрева можно выполнять при большом ветре внутренними горелками на центраторе и отдельных трубах до центровки с целью увеличения темпа прокладки трубопровода. Первый слой шва выполняют одновременно четыре сварщика электродами с целлюлозным покрытием (ВСЦ-4А, ВСЦ-Т) диаметром 4 мм с использованием тока прямой полярности. Для подварки корня шва внутри трубы часто принимает участие пятый сварщик. Второй слой шва («горячий проход») выполняют те же сварщики электродами ВСЦ-4А, ВСЦ-Т или ВСФС-50 диаметром 4—5 мм на токе обратной полярности. Сварку двух швов ведут на постоянном токе от источника питания, имеющего крутопадающую характеристику с напряжением холостого хода не менее 70 В. Последующие заполняющие слои выполняют четыре сварщика на каждом слое тотчас после сварки второго шва электродами ВСФ-65 снизу вверх с небольшими колебательными движениями, при-

меняя постоянный ток обратной полярности. Меньшие значения тока используют для сварки с максимально допустимым зазором, а большие — с минимальным. После сварки каждого слоя тщательно зачищают поверхность шва от шлака электрошлифовальными машинками, оснащенными абразивными кругами толщиной 5—6 мм или круговыми металлическими щетками. Облицовочный шов выполняют три сварщика электродами ВСФ-65 снизу вверх с небольшими поперечными колебательными движениями. Сварку всех слоев проводят так, чтобы начало и конец валков перекрывались на 15—20 мм. По окончании сварки или после вынужденных перерывов стык укрывают теплоизоляционным поясом.

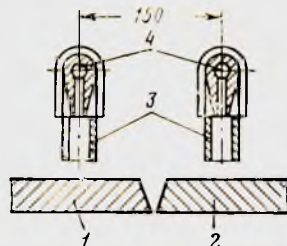


Рис. 74. СХЕМА ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО ПОДОГРЕВА ТРУБ ПЕРЕД СВАРКОЙ:

1, 2 — свариваемые трубы;  
3 — горелка; 4 — подвод газа

Дальнейшее повышение темпа сварочных работ достигается применением поточно-расчлененного метода (см. рис. 73, б), предусматривающего выполнение первого и второго слоя шва отдельными сварщиками с использованием электродов с целлюлозным покрытием. По этой технологической схеме операцию по зачистке труб заменяют механической обработкой кромок станком СПК-141 для создания рациональной разделки кромок и обеспечения минимального количества наплавленного металла. Для повышения производительности сварки заполняющих и облицовочного слоев шва электродами с целлюлозными покрытиями целесообразно выполнять работы электродами диаметром до 6,5 мм при повышенных токах, что позволяет в зарубежной практике сократить время сварки на 30—35 %. Для ручной электродуговой сварки неповоротных стыков применяют двухпостовые установки типа УС-21 и четырехпостовые УС-41, а также восьмипостовые установки АС-81, которые подбирают из расчета обеспечения всех одновременно работающих сварщиков и создания резерва из одного-двух постов. Подача секций к месту центровки и ее осуществление выполняют с помощью трубоукладчиков К-594, Т-3560М и т. п. Качество сварки неповоротных стыков контролируют передвижными лабораториями РМЛ-2В, ВЛК-2 или автоматизированными комплексами АКП-141, АКП-143 и др.

### Форма шва и его отдельных слоев

При многослойной сварке стыковых соединений форма поверхности валика шва зависит от того, является ли слой корневым, заполняющим или облицовочным. Корневой слой перекрывается последующим валиком, поэтому ему придают наиболее выгодную форму, облегчающую наложение последующего слоя.

При скоростной сварке корня шва электродами с целлюлозным покрытием часто возникают боковые непровары «карманы», в которых остается шлак (рис. 75). Для удаления шлака применяют шлифовальный круг толщиной 3 мм, с помощью которого обеспечивают снятие  $\frac{1}{4}$  части корневого слоя шва и удаление шлака из «карманов». Последующие слои шва стремятся выполнять таким образом, чтобы наплавленный валик имел вогнутую поверхность с плавным переходом к кромкам труб. Это необходимо для того, чтобы следующий слой сплавился с ним по всему контуру, а также с основным металлом. Если плавного перехода между поверхностью наплавленного металла и кромки труб не обеспечено, то сварщику требуется расплавить выпуклость валика, что снижает производительность процесса. Последний облицовочный слой должен иметь выпуклую поверхность с плавным переходом от наплавленного металла к основному. Высота усиления шва, в зависимости от толщины стенки трубы, должна быть не менее 1 мм и не более 3 мм. Ширина шва должна обеспечивать перекрытие кромок не менее 3 мм в каждую сторону.

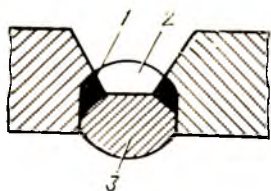


Рис. 75. ФОРМА ШВОВ  
ДЛЯ НАЛОЖЕНИЯ ПОСЛЕДУЮЩИХ ВАЛИКОВ:

1 — шлак; 2 — наплавленный металл, удаляемый при шлифовке; 3 — корневой слой

Сварные соединения при внешнем осмотре не должны иметь трещин, пор, кратеров, подрезов глубиной 0,5 мм и грубой шероховатости.

### ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОЛОГИИ СВАРКИ ТРУБОПРОВОДОВ, ТРАНСПОРТИРУЮЩИХ АГРЕССИВНЫЕ СРЕДЫ

Для сооружения промышленных трубопроводов, транспортирующих природный газ, содержащий сероводород, используют малоуглеродистые стали марок 10, 20 и низколегированные — 12ХМ, 12Х1МФ, 14ХГС, 15ХМ. В процессе сварки трубопроводов из малоуглеродистых и низколегированных сталей в зонах, удаленных от высокотемпературной области, возникает холодная пластическая деформация. Попадая при наложении последующих швов под сварочный нагрев до температуры около 300 °С, эти зоны становятся участками деформационного старения, приводящего к снижению пластических свойств и повышению прочностных свойств металла и возможному возникновению трещин, особенно при низких температурах или при наличии концентраторов напряжений. В этих случаях эффективным средством для снятия остаточных сварочных напряжений, которые являются одним из факторов, определяющих склонность соединений к коррозионному растрескиванию при транс-

портировании сероводородной среды, служит высокий отпуск. Нормализации подвергают фасонные детали грубопроводов для улучшения структуры отдельных участков сварных соединений и выравнивания их свойств. Термообработка, кроме закалки сварных соединений, в которых шов и околшовная зона охлаждались с повышенными скоростями, приведшими к образованию на некоторых участках неравновесных структур закалочного характера (последующие проходы, выполнение на полностью остывших предыдущих), снижает прочностные и повышает пластические свойства металла в этих участках. При сварке короткими участками по горячим предварительно наложенным швам замедленная скорость охлаждения металла шва и околшовной зоны способствует получению равновесных структур. При сварке среднелегированных сталей Х5М, Х5 и других повышение содержания углерода, а также степени легирования стали увеличивает склонность стали к резкой закалке, в связи с чем такие стали обладают высокой чувствительностью к термическому циклу сварки и околшовная зона оказывается резко закаленной, а следовательно, непластичной при всех режимах сварки, обеспечивающих удовлетворительно формирование шва. Для снижения скорости охлаждения околшовной зоны и получения в ней структур, обладающих некоторым запасом пластичности, достаточным для предотвращения образования трещин под действием термдеформационного цикла, при сварке этих сталей необходим предварительный подогрев свариваемого изделия. При необходимости подогрева стыка перед сваркой температура его может быть оценена по методике Д. Сефернана, учитывающей химический состав свариваемой стали и ее толщину. Согласно этой методике полный эквивалент углерода  $C_3''$  определяют по формуле  $C_3'' = C_3 + C_3'$ , где  $C_3$  — химический эквивалент углерода;  $C_3'$  — размерный эквивалент углерода.

$$C_3 = C \% + 1/9 (Mn \% + Cr \%) + 1/8 Ni \% + 1/13 Mo \%$$

Влияние толщины свариваемого металла  $\delta$  учитывается поправкой  $C_3' = 0,005\delta C_3$ . Тогда полный эквивалент углерода

$$C_3'' = C_3 + C_3' = C_3 (1 + 0,005\delta),$$

температура предварительного подогрева  $T_{под} = 350 \sqrt{C_3'' - 0,25}$ . Полученная температура предварительного подогрева должна быть проверена и откорректирована путем определения действительных скоростей охлаждения при сварке на принятых режимах и сопоставления результатов расчета с рекомендуемым для данной марки стали диапазоном допустимых скоростей охлаждения.

Концы труб под сварку обрабатывают механическим способом (абразивным кругом, резцом, фрезой и т. п.). В необходимых случаях применяют газовую или плазменную резку, после

чего абразивным инструментом зачищают поверхности реза на глубину не менее 1 мм. Если применяют трубы из стали 12ХМ, 15ХМ и им подобные, то при отрицательной температуре термическую резку необходимо проводить с предварительным подогревом до температуры 200—250 °С с последующим медленным охлаждением. Трубы под сварку собирают с помощью наружных центраторов до диаметра 530 мм, а трубы большего диаметра — с помощью внутренних центраторов. При отрицательной температуре воздуха концы труб на длине 150 мм перед сваркой подогревают.

При сварке труб из хромомолибденовой стали первые два слоя выполняют с плавным поворотом секции. Прихватку и сварку корневого слоя выполняют электродами диаметром 2—3,25 мм, последующие слои — электродами диаметром 4 мм. Запрещается прекращать сварку стыков труб до заполнения  $\frac{2}{3}$  разделки шва по всей окружности. При вынужденных перерывах в работе обеспечивают медленное охлаждение стыка в теплоизоляции.

Для снижения остаточных сварочных напряжений, которые являются одним из факторов, определяющих склонность сварных соединений к коррозионному растрескиванию, и ликвидации элементов неравновесных структур применяют термическую обработку. Наиболее распространен отпуск с температурой 600—700 °С ( в зависимости от марки стали). Термическую обработку стыков труб из сталей 20, 14ХГС, 12ХМ, 15ХМ проводят не позднее чем через 15 сут после сварки, если стыки были сварены с подогревом. В монтажных условиях сварные соединения нагревают электрическими нагревателями (печи) сопротивления, индукционным, комбинированным или газопламенным способами.

Для термической обработки сварных соединений технологических трубопроводов применяют гибкие электрические нагреватели сопротивления (ГЭН). Эти нагреватели имеют большую удельную мощность (45—50 кВт на 1 м<sup>2</sup> поверхности), позволяют использовать сварочные источники питания (трансформаторы и преобразователи). Стыки магистральных трубопроводов нагревают при помощи разъемных муфельных печей сопротивления ПТО. Для трубопроводов диаметром 57 мм и менее можно использовать газовые горелки.

### **СВАРКА ТЕРМИЧЕСКИ УПРОЧНЕННЫХ СТАЛЕЙ**

Для сооружения магистральных трубопроводов с 1974 г. в нашей стране применяют термически упрочненные трубы из низколегированной стали 17Г2СФ, 17Г1С, 16ГБР, 16ГФР и др. При сварке термически упрочненных сталей в зоне термического влияния образуется участок, имеющий меньшую прочность, чем основной металл. Одним из основных показателей



пригодности термически упрочненного металла является его стойкость против разупрочнения в результате воздействия термического цикла сварки. При оценке свариваемости термически упрочненных труб из низколегированных сталей необходимо учитывать наличие двух основных участков неоднородности в зоне термического влияния.

Участок полной перекристаллизации (первый участок), нагреваемый выше температуры  $A_{c3}$ , свойства которого определяются в первую очередь химическим составом свариваемой стали, максимальной температурой нагрева, длительностью пребывания металла выше температуры  $A_{c3}$  претерпевает полиморфные превращения. Хотя структура металла и является полностью аустенитной при высоких скоростях охлаждения и температуре более  $40^\circ\text{C}$ , характерных для сварки корневого слоя шва, в интервале температур  $500\text{—}600^\circ\text{C}$  в околошовной зоне могут образоваться структуры промежуточного распада, способствующие увеличению склонности сварных соединений к образованию холодных трещин и снижению ударной вязкости. Второй участок разупрочнения в зоне термического влияния образуется в результате нагрева термоупрочненных сталей до температуры  $A_{c1}\text{—}A_{c3}$ , что связано в основном с активацией процессов коагуляции карбидов. На параметры этого участка влияет соотношение скорости закалки стали и действительной скорости охлаждения металла при сварке. Характер разупрочнения индивидуален для каждой марки стали и зависит от ее химического состава, температуры отпуска после закалки и режимов сварки. По типу разупрочнения сварные соединения можно разделить на три группы: с минимальной прочностью на участке перекристаллизации, когда действительная скорость охлаждения намного меньше критической; с минимальной прочностью на участке отпуска, когда скорость охлаждения равна или больше критической; с двумя минимумами — на участке отпуска и нормализации, когда скорость охлаждения несколько ниже критической. Изменяя скорость охлаждения, можно получить любой из трех типов разупрочнения. Проверка склонности сварных соединений к образованию холодных трещин показала, что сварные соединения стали 16ГФР обладают большей склонностью к трещинообразованию, чем стали 17Г1С и 17Г2СФ.

При сварке термически упрочненных сталей необходимую температуру подогрева определяют с использованием химического эквивалента углерода  $C_0$  по формуле

$$C_0 = C + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{\text{Cr} + \text{Mo} + \Sigma(\text{V} + \text{Nb} + \text{Ti})}{5} + \frac{\text{Ni} + \text{Cu}}{15} + 15\text{В}.$$

Для обеспечения требуемой работоспособности сварных соединений корневой слой шва выполняют электродами, имеющими  $\sigma_{\text{в}} = 630\div 660$  МПа (ВСФ-65), а заполняющие слои и

облицовочный — электродами ВСФ-85 ( $\sigma_{\text{в}} = 810 \div 860$  МПа). При этом обеспечивается минимальная зона разупрочнения не более 6 мм. Погонная энергия сварки должна быть не более  $1,89 \cdot 10^4$  Дж/см, а температура предварительного подогрева не должна превышать 250 °С.

### СПЕЦИАЛЬНЫЕ СВАРОЧНЫЕ РАБОТЫ ПРИ МОНТАЖЕ ТРУБОПРОВОДОВ

Для надежной работы магистральных и технологических трубопроводов большую роль играет правильный выбор технологии специальных сварочных работ, к которым относятся: вварка вставок, захлестов, запорной арматуры, приварка выводов средств электрозащиты и т. п. Эти работы обычно включают некоторые дополнительные приемы и операции, направленные на снижение остаточных сварочных напряжений, обеспечение полного провара свариваемых кромок (в некоторых случаях подварка изнутри невозможна), повышение деформационной способности металла шва путем применения только низкоуглеродистых электродов с основным покрытием, обеспечивающих высокий уровень вязко-пластических свойств и т. п.

Специальные работы по вварке вставок, захлестов, запорной арматуры и других необходимо проводить после укладки трубопровода в траншею и засыпки его землей на всем протяжении, кроме участка длиной 25—50 м по обе стороны от стыка. Засыпкой трубопровода землей устраняют влияние температуры в различное время суток на изменение длины трубопровода, что облегчает сборку стыка. В летнее время эти работы целесообразно проводить при минимальной температуре воздуха во избежание опасного уровня температурных напряжений в сварочных соединениях.

При сборке захлесточных стыков концы плетей временно накладывают с помощью трубоукладчика одну на другую (захлестывают) и отмечают место обрезки на одной из петель, используя для обрезки чаще верхнюю плеть. Операции по обрезке и скашиванию кромок проводят с частыми подъемами и опусканиями стыкуемой плети для обеспечения требуемого зазора. При подготовке кромок используют механизированные способы газовой резки и механической обработки кромок. После подгонки стыкуемую плеть опускают на дно траншеи и собирают стык с применением наружного многозвенного центратора. Собранный стык сваривают усиленными прихватками, а затем заваривают в несколько проходов с применением электродов с основным покрытием. За рубежом для обеспечения более полного провара корня шва иногда используют электроды с целлюлозным или рутиловым покрытием диаметром 2,5—3 мм. При этом сварку выполняют снизу вверх. Если захлесточные стыки сваривают при отрицательной температуре,

то необходимо после сварки закрыть стык теплоизоляционным поясом для замедления скорости охлаждения. При строительстве магистральных трубопроводов краны к трубопроводам приваривают. Патрубки кранов обычно изготавливают литыми, при этом толщина патрубка находится в пределах 16—34 мм, в то время как толщина стенки трубы обычно 10—22 мм. Патрубок с трубой соединяют через переходное кольцо. Сборку и сварку корневого и второго слоев шва проводят на внутреннем гидравлическом центраторе. При сварке крановых узлов больших диаметров первый (корневой) слой шва выполняют после предварительного подогрева. Температуру подогрева устанавливают исходя из значения химического эквивалента углерода ( $C_e$ ), определяемого по формуле МИС, и толщины стенки патрубка крана. Ширину нагрева ограничивают до 250 мм, а температуру нагрева до 250 °С, исходя из перегрева уплотняющих прокладок в теле крана. Сварку начинают с нижней образующей, по мере приближения сварщика к верхней образующей температура металла снижается за счет теплоотвода в тело трубы соединения и в окружающую атмосферу. Сварку заканчивают при положительной температуре не ниже 30—50 °С. Число слоев шва зависит от толщины свариваемых элементов и может быть от 4 до 10 при толщинах патрубков 15—34 мм. Первый (корневой) и второй слой шва выполняют снаружи соединения обратнеступенчатым способом (длина ступени равна длине шва от расплавленного электрода). Внутренний центратор убирают и ведут сварку изнутри по всему периметру стыка на проход. Далее вторично подогревают стык и сваривают заполняющие и облицовочный слои. Сварку выполняют непрерывно два—четыре одновременно работающих сварщика, число которых зависит от диаметра запорной арматуры. Для сварки корневого шва применяют электроды диаметром 3 или 3,25 мм, а для сварки заполняющих и облицовочных слоев шва — электроды диаметром 4 мм. Патрубки сваривают электродами с основным покрытием (при  $C_e$  до 0,45 %) типа Э50А. По завершении сварочных работ стык накрывают сухим теплоизоляционным поясом шириной 250—300 мм до полного остывания.

Выводы средств электрохимической защиты трубопроводов от коррозии изготавливают в нашей стране преимущественно из малоуглеродистой проволоки Св-08, Св-08А, Св-08АА или из стали 10 диаметром 4—12 мм. Длина привариваемой части катодного вывода должна быть не менее 50 мм (рис. 76). Наконечник катодного вывода на длине 150 мм и место его приварки тщательно зачищают. К трубам из низколегированных сталей ( $\delta_v$  до 540 МПа) катодные выводы приваривают электродуговой ручной сваркой как к поверхности трубы, так и сварочным швам (кольцевым монтажным или продольным заводским). Приваривать катодные выводы к трубам из стали повышенной

и высокой прочности ( $\sigma_b$  равно или более 550 МПа) или из термически упрочненных сталей можно только к продольным заводским швам электродами с основным покрытием Э50А диаметром 3 мм при токе 110—120 А. Сварку выполняют непрерывным угловым швом с двух сторон. Катет шва соответствует диаметру катодного вывода. Катодные выводы приваривают к трубе чаще после нанесения изоляции, что вызывает затруднение для ручной сварки. В этом случае более технологично присоединять катодный вывод к заводскому продольному шву (рис. 77) с помощью пластины, изготовленной из металла трубы. Сварной шов в месте соединения переходной пластины

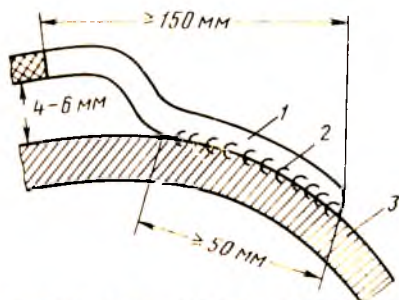


Рис. 76. ПРИ СВАРКЕ КАТОДНОГО ВЫВОДА К ТРУБЕ:

1 — наконечник катодного вывода; 2 — место сварки; 3 — труба

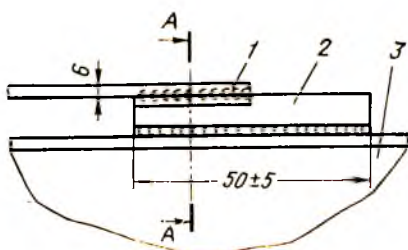
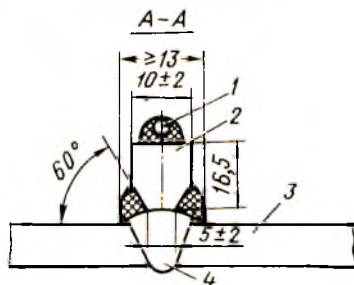


Рис. 77. ПРИ СВАРКЕ КАТОДНОГО ВЫВОДА ЧЕРЕЗ ПЕРЕХОДНУЮ ПЛАСТИНУ:

1 — катодный вывод; 2 — переходная пластина; 3 — труба; 4 — продольный шов трубы



с продольным заводским швом трубы соединяют таким образом, чтобы его ширина не была больше ширины заводского шва. При сварке не допускают зажигание дуги на поверхности трубы. Наиболее перспективным методом приварки катодного вывода к трубе является термитная сварка, позволяющая получить минимальную зону термического влияния. Применение медного термита, состоящего из механической смеси порошков окиси меди (64 %), сплава алюминий — медь (20 %), ферромарганца (16 %), позволяет обеспечить ширину зоны термического влияния не более 2 мм. В полевых условиях катодный вывод соединяют с трубопроводом термитной сваркой, используя тигель-форму ТФГ, изготовленную из электродного графита ЭГ-0, ЭГ-1 и ЭГ-2.

При сварке в среде защитных газов (газоэлектрическая сварка) электрическая дуга горит в среде защитного газа (аргона, гелия, углекислого газа), подаваемого из сопла горелки. Газ струей обтекает электрод, защищая сварочную ванну от вредного влияния воздуха. Аргон и гелий применяют для сварки алюминиевых, магниевых и титановых сплавов. Из-за высокой стоимости эти газы не применяют для сварки низколегированных сталей, для которых используют углекислый газ, а в некоторых случаях смесь его с другими газами. Сварка в среде углекислого газа обладает той особенностью, что ее процесс сопровождается меньшим перегревом расплавленного металла вследствие интенсивного теплоотвода и лучеиспускания. Быстрый теплоотвод от металла шва и его высокая вязкость позволяют использовать этот вид сварки для выполнения швов в разных пространственных положениях полуавтоматами и автоматами.

#### ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА СВАРКИ В СРЕДЕ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА

Условия существования сварочной дуги при сварке в среде углекислого газа в значительной степени зависят от характера переноса металла через нее. Характер переноса металла оказывает влияние на технологические и металлургические показатели сварочного процесса. Различают несколько основных форм переноса металла: крупно- или мелкокапельный с короткими замыканиями дугового промежутка, капельный без коротких замыканий, струйный мелкокапельный, парами металла. Последняя форма сопутствует всем основным формам. Ток и его плотность оказывают влияние на размер капель. При увеличении плотности тока уменьшаются размеры капель. При крупнокапельном переносе наблюдаются резкие колебания длины дуги и частые ее замыкания. С увеличением плотности тока (более 150—220 А/мм<sup>2</sup>) наблюдается струйное стекание металла в зону дуги и перенос осуществляется мелкими каплями. С ростом напряжения дуги увеличивается размер капель и уменьшается их число. Крупные капли находятся более длительное время в контакте с газами плазмы дуги, что приводит к окислению металла и выгоранию содержащихся в нем примесей, поэтому на практике стремятся применять сварочные режимы, обеспечивающие мелкокапельный перенос металла.

При сварке в среде углекислого газа все наблюдаемые явления можно проследить в ряде сходных циклов. Для каждого цикла  $T$  характерны изменения тока и напряжения на дуге (рис. 78), которые соответствуют отдельным фазам перехода



капли электродного металла в ванну. После зажигания дуги тепло интенсивно расплавляет проволоку и вызывает образование капли на конце электрода. Электрод, оплаваясь, образует дуговой промежуток, длина которого зависит от установленного напряжения. Объем капли увеличивается без существенного изменения длины дугового промежутка. Этот процесс длится на протяжении горения дуги  $t_1$ . Так как скорость подачи электродной проволоки сохраняется постоянной, то электрод с каплей металла приближается к ванне и замыкает

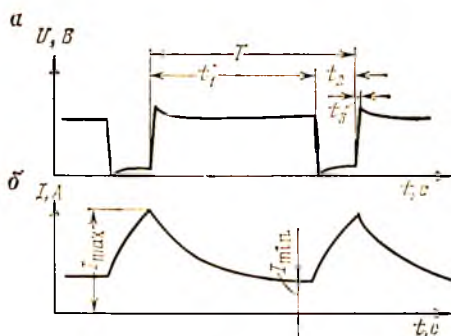


Рис. 78. ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ДУГИ (а) и ТОКА (б) ПРИ СВАРКЕ В СРЕДЕ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА



Рис. 79. ИЗМЕНЕНИЯ СОСТАВА ГАЗА  $v$  ПО ОСИ СВАРОЧНОЙ ВАННЫ И ТЕМПЕРАТУРЫ  $T$  В ЗОНЕ СВАРКИ:

1, 3 — соответственно температура металла и газа; 2, 4 — то же, средняя

дуговой промежуток. После замыкания дугового промежутка капля переходит в ванну. При этом дуга гаснет, ток короткого замыкания возрастает до величины  $I_{\max}$ , напряжение падает. Время горения дуги  $t_1$  существенно влияет на химический состав металла шва, а величины  $t_2$ ,  $t_3$  и  $I_{\min}$  характеризуют в основном свойство источника питания и его способность обеспечить устойчивость процесса сварки. Ток короткого замыкания оказывает сжимающее действие на каплю металла, ускоряя переход ее в ванну за счет аксиального усилия. Разрыв перемычки происходит со взрывом, напряжение мгновенно возрастает до значения, превосходящего установленное напряжение сварки, и дуга зажигается. В дальнейшем весь сварочный цикл повторяется.

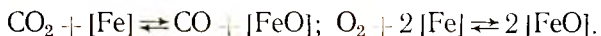
Углекислый газ, обеспечивающий защиту сварочной ванны от воздействия воздуха, является вместе с тем окислительной средой, диссоциирующей в зоне высоких температур по следующей реакции:  $\text{CO}_2 \rightleftharpoons \text{CO} + \frac{1}{2}\text{O}_2 - Q$ . Расход энергии на диссо-

пнацию газа  $Q$  составляет 20—25 % от общих затрат энергии в дуге.

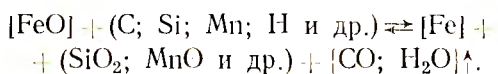
При высоких температурах, развивающихся в столбе дуги, углекислый газ полностью диссоциирует (рис. 79). В зонах более низкой температуры идет процесс рекомбинации молекул  $\text{CO}$  и  $\text{CO}_2$ , сопровождающийся выделением тепла. В результате особенностей физико-химических процессов, протекающих при сварке в среде углекислого газа, достигается меньшая сосредоточенность теплового потока по сравнению с дугой, горящей в аргоне.

Газовая защита дуги, горящей в  $\text{CO}_2$ , имеет более окислительный характер (33 %  $\text{O}_2$ ), чем на воздухе (21 %  $\text{O}_2$ ). Поэтому, несмотря на надежную защиту сварочной зоны от азота воздуха, возникает необходимость предотвращения окисления сварочной ванны и выгорания углерода, кремния, марганца и других легирующих элементов, которые наблюдаются при сварке проволокой типа Св-08.

Окисление железа в области высоких температур может происходить двумя путями: непосредственно углекислым газом и кислородом, образующимся в результате диссоциации, а также случайно попавшим в зону сварки:



Образовавшаяся закись железа, находящаяся в жидком металле в растворенном состоянии, реагирует с элементами и образует с ними шлаки и газы



При сварке в среде углекислого газа в швах могут появляться поры в следующих случаях: при наличии ржавчины или большого количества окалины на свариваемых поверхностях, от чрезмерной влажности углекислого газа и свариваемых поверхностей, при недостаточной защите зоны сварки от воздуха (малый расход углекислого газа, большие зазоры между свариваемыми кромками), при повышенном содержании азота в углекислом газе, при недостаточном содержании элементов-раскислителей в свариваемом и присадочном металлах. Содержание азота и водорода в наплавленном металле находится в прямой зависимости от содержания этих газов в дуговом пространстве.

Одной из главных причин, вызывающих образование пор в металле шва, является выгорание углерода и выделение его окиси из металла в процессе кристаллизации:  $[\text{C}] + [\text{FeO}] \rightleftharpoons \text{CO} + [\text{Fe}]$ . Для подавления порообразования при сварке в среде  $\text{CO}_2$  в сварочную ванну вводят раскислители либо через сварочную проволоку, либо через специальный защитно-легирующий флюс.

Для сварки малоуглеродистых и низколегированных сталей применяют электродные проволоки, содержащие марганец и кремний Св-08ГСА и Св-08Г2СА. При сварке кремнемарганцовистой проволокой малоуглеродистых и низколегированных сталей в некоторых случаях возможно образование шлака ( $\text{MnO}$ ;  $\text{SiO}_2$ ), что может вызвать увеличенное количество дисперсных неметаллических включений размером 5—15 мкм, снижающих пластические свойства металла шва. Для снижения силикатных включений в шве требуется выдерживать определенное соотношение между количеством марганца и кремния, при котором обеспечивается образование жидких шлаков ( $T_{\text{пл}} = 1600^\circ\text{C}$ ) и всплытие их на поверхность шва.

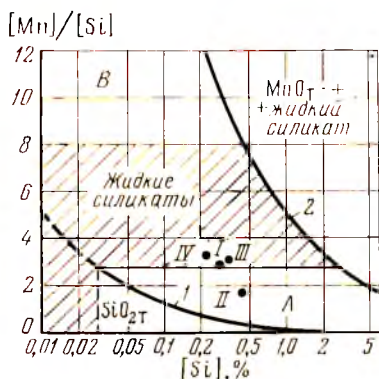


Рис. 80. ОБЛАСТИ СУЩЕСТВОВАНИЯ ТВЕРДЫХ И ЖИДКИХ ПРОДУКТОВ РАСКИСЛЕНИЯ МАРГАНЦЕМ И КРЕМНИЕМ ПРИ  $T=1600^\circ\text{C}$ :

1 — граница твердого  $\text{SiO}_2$ ; 2 — граница твердых растворов на основе окиси марганца; A и B — гетерогенные частицы продуктов раскисления в жидко-твердом состоянии; I—IV — композиции швов при сварке малоуглеродистой стали проволоками Св-08ГСА и Св-08Г2СА

На рис. 80 приведена диаграмма распределения твердых и жидких продуктов раскисления, легированных марганцем и кремнием ( $T=1600^\circ\text{C}$ ), а швах при сварке малоуглеродистой стали проволоками Св-08ГСА и Св-08Г2СА. Для швов I, III, IV при соотношении  $\text{Mn/Si} > 3$  достигается получение жидких шлаков, всплывающих на поверхность шва, и отсутствие силикатных включений в металле шва. Механические свойства сварных соединений, выполненных в среде углекислого газа, не уступают свойствам соединений, выполненных под флюсом.

### СВАРКА ПОВОРОТНЫХ СТЫКОВ ТРУБОПРОВОДОВ

Сварку в среде углекислого газа применяют для выполнения первого (корневого) слоя шва поворотных стыков магистральных трубопроводов на полустационарных трубосварочных базах, а также для всех слоев швов трубопроводов малого диаметра с большой толщиной стенки. Сварочные установки полустационарных трубосварочных баз имеют источник электрического тока, стационарный пункт электрогазового питания в комплекте с полуавтоматами А-547Р или аналогичными им

А-547У, А-1197, А-1230М и др. В качестве источника тока применяют сварочные агрегаты с двигателями внутреннего сгорания, выпрямители в сочетании с передвижными дизельными электростанциями. Такие электростанции могут питать током соответственно один-два стационарных сварочных поста.

Трубы малого диаметра (168—325 мм) собирают в секции с помощью внутренних или наружных центраторов на установках для автоматической сварки УТ-1 или УТ-1А, а также на механизированных трубосварочных линиях МТЛ. Сборку секций труб для полуавтоматической и автоматической поворотной сварки в среде углекислого газа выполняют с зазором 2—3,5 мм. В процессе сборки может производиться прихватка труб с помощью полуавтоматической сварки в среде углекислого газа или ручной и дуговой сваркой без снятия центра-



Рис. 81. ПОРЯДОК НАЛОЖЕНИЯ ШВОВ ПРИ СВАРКЕ КОРНЕВОГО СЛОЯ

торов. Ручную электродугую сварку выполняют электродами УОНИ-13/55 диаметром 3 мм. Прихватку осуществляют высококвалифицированные сварщики, которые обеспечивают провар корня шва и не допускают прожогов в области кратеров.

Для сварки труб в среде углекислого газа применяют тонкую электродную проволоку диаметром 0,8—1,2 мм. Сварочный ток можно определить из эмпирической формулы  $I = 100d(d - 0,5) + 50$ , где  $d$  — диаметр электрода. Напряжение при газозащитной сварке  $U = 8(d + 16)$ . Стабильное горение дуги, минимальное разбрызгивание и хорошее формирование металла шва достигают, если сварку в среде углекислого газа ведут на постоянном токе обратной полярности.

При сварке корневого слоя шва на линиях МТЛ прихватки не переплавляются. Вначале сваривают полуавтоматом четверть окружности трубы. Сварку ведут электродной проволокой диаметром 1,2 мм в направлении сверху вниз (рис. 81, а) «углом назад» с опиранием сопла полуавтомата на кромки труб при режимах, приведенных в табл. 13. Первый шов выполняют два сварщика на двух стыках. Давление газа направляют по манометру таким образом, чтобы обеспечить надежную защиту дуги. При скорости ветра 3—5,2 м/с сварку ведут в палатке или другом укрытии. После наложения слоя шва на первой четверти окружности обоих стыков труб секцию поворачивают на 90° с помощью вращателя, обеспечивая сварку шва по всему периметру стыка. Кроме периодического поворачивания секции сварку выполняют также с непрерывным

Таблица 13

РЕЖИМЫ СВАРКИ В СРЕДЕ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ  
В РАЗЛИЧНЫХ ПОЛОЖЕНИЯХ

| Толщина<br>металла, мм                                                        | Зазор при<br>сборке, мм | Сварочный<br>ток, А | Напря-<br>жение,<br>В | Скорость<br>сварки,<br>м/ч | Вылет<br>электро-<br>да, мм | Расход<br>газа,<br>л/мин |
|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------|---------------------|-----------------------|----------------------------|-----------------------------|--------------------------|
| Первый слой шва (нижнее положение)                                            |                         |                     |                       |                            |                             |                          |
| 4                                                                             | 0,8—2                   | 150                 | 20                    | 18                         | 12                          | 8—9                      |
| 6                                                                             | 1,2—2,5                 | 160                 | 20                    | 12                         | 11—12                       | 8—10                     |
| 8                                                                             | 1,5—3                   | 160                 | 20                    | 9                          | 11—12                       | 10                       |
| 10                                                                            | 1,5—3                   | 170—190             | 21                    | 8                          | 11—12                       | 11                       |
| Последующие слои шва (нижнее положение)                                       |                         |                     |                       |                            |                             |                          |
| 4                                                                             | 0,8—2                   | 180                 | 25                    | 20                         | 15                          | 12                       |
| 6                                                                             | 1,2—2,5                 | 260                 | 26                    | 18                         | 18                          | 13                       |
| 8                                                                             | 1,5—3                   | 260                 | 27                    | 18                         | 18                          | 14                       |
| 10                                                                            | 1,5—3                   | 280                 | 28                    | 18                         | 18                          | 15                       |
| Последующие слои шва (вертикальное,<br>горизонтальное и потолочное положения) |                         |                     |                       |                            |                             |                          |
| 3—4                                                                           | 1—1,5 *                 | 190—220             | 21                    | 40                         | 10                          | 8                        |
| 8—10                                                                          | 1—1,5 *                 | 190—220             | 21                    | 8                          | 9                           | 10                       |
| 5                                                                             | 1 **                    | 180                 | 21                    | 18                         | 10                          | 9                        |
| 8                                                                             | 1 **                    | 170                 | 21                    | 12                         | 10                          | 10                       |
| 5—6                                                                           | 1—1,5 ***               | 180                 | 21                    | 22                         | 11                          | 9                        |
| 8—10                                                                          | 1—1,5 ***               | 180                 | 21                    | 8                          | 10                          | 9                        |

\* — вертикальное положение, \*\* — горизонтальное положение, \*\*\* — потолочное положение.

вращением (рис. 81, б). В этом случае держатель полуавтомата не перемещается по периметру стыка и сварку ведут на одном участке, отстоящем под углом 30—35° от вертикальной оси трубы в сторону, обратную направлению вращения секции. При поворотной сварке труб диаметром 89—273 мм на установках УТ1 и УТ1А все швы выполняют в среде углекислого газа. Сварочную головку СГ301 устанавливают на предварительно собранный и прихваченный стык (рис. 81, в) с отклонением от вертикальной оси на 30—35° в сторону, обратную направлению вращения секции.

При автоматическом режиме сварки в среде углекислого газа сварочный ток определяют по формуле

$$I = 1575 \alpha_p \ln(1 + \alpha T) d^2 / l,$$

где  $\alpha_p$  — коэффициент расплавления, г/(А·ч);  $\alpha$  — коэффициент теплопроводности стали, 1/°С;  $T$  — температура нагрева вылета электрода,  $T = 400$  °С;  $l$  — вылет электрода, мм (принимают максимальное значение 8 мм);  $d$  — диаметр электродной проволоки, мм,



Площадь поперечного сечения каждого наплавленного слоя

$$F_{\text{ш}} = I \alpha_{\text{н}} / (3600 v_{\text{св}} \rho),$$

где  $\alpha_{\text{н}}$  — коэффициент наплавки, г/(А·ч);  $v_{\text{св}}$  — скорость сварки, см/с;  $\rho$  — плотность наплавленного металла, г/см<sup>3</sup>.

Коэффициент расплавления  $\alpha_{\text{р}}$  состоит из двух слагаемых:  $\alpha_{\text{р}} = \alpha'_{\text{р}} + \Delta\alpha_{\text{р}}$ , где  $\alpha'_{\text{р}}$  — составляющая коэффициента расплавления, обусловленная тепловложением дуги;  $\Delta\alpha_{\text{р}}$  — составляющая коэффициента расплавления, зависящая от тепловложения вследствие предварительного нагрева вылета электрода протекающим током. Следовательно, суммарный коэффициент расплавления

$$\alpha_{\text{р}} = 9,05 + 3,1 \cdot 10^{-3} \sqrt{T} l/d^2.$$

Скорость подачи проволоки

$$v_{\text{п}} = I (9,05 + 3,1 \cdot 10^{-3} \sqrt{T} l/d^2) / (3600 F_{\text{э}} \rho),$$

где  $F_{\text{э}}$  — площадь поперечного сечения электродной проволоки.

Поворотную сварку первого слоя шва на трубах диаметром 1220—1420 мм можно выполнять автоматом ИК-6 в среде углекислого газа. Сборку труб осуществляют на линиях МТЛ с помощью внутреннего центратора. Стыки собирают с зазором 1—1,5 мм. Собранный на центраторе стык прихватывают ручной или полуавтоматической сваркой в среде углекислого газа. Затем внутрь трубы устанавливают автомат ИК-6 со смещением электрода с надира до 250 мм в сторону, обратную направлению вращения секции. Сварку ведут с наклоном электрода «угол вперед» на 10° при следующих режимах: ток 360—380 А, напряжение на дуге 36—38 В, скорость сварки 50—55 м/ч и давление углекислого газа 0,1—0,2 МПа. При сварке автоматом ИК-6 электрод может совершать колебания с частотой 4,8 Гц и амплитудой 0—6 мм.

#### **ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ГАЗОЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СВАРКИ ПОВОРОТНЫХ СТЫКОВ**

Отечественная промышленность располагает значительным числом различных автоматов и полуавтоматов для сварки в среде защитных газов. В трубопроводном строительстве применяют полуавтоматы и автоматы для сварки плавящимся электродом А-547Р (А-547, А-547У), А-1230М, СГУ-301, ИК-6.

*Полуавтомат А-547Р* (А-547, А-547У) предназначен для сварки плавящимся стальным электродом в среде углекислого газа. Особенность полуавтомата — облегченный держатель

с коротким шлангом длиной 0,8—1 м (рис. 82). Полуавтомат рассчитан на электродную проволоку диаметром 0,8—1,2 мм и его используют для сварки первого слоя шва. В комплект полуавтомата входят пульт управления 1; подающий механизм, размещенный в чемодане 7; сварочный держатель 9 с гибким шлангом 8; защитный щиток 10; газовая система, состоящая из баллона 3 с газом, подогревателя 2, осушителя газа 4 и редуктора 5; провода управления 6. Держатель полуавтомата А-547Р малогабаритный, облегченный. Сопла и наружные де-

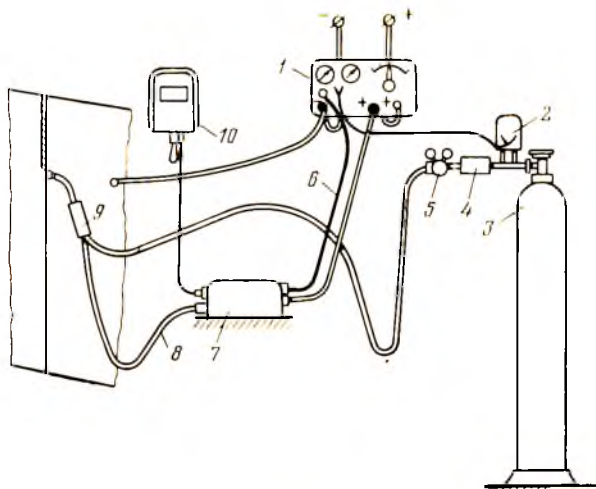


Рис. 82. СХЕМА ПОСТА ДЛЯ СВАРКИ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОНСТРУКЦИЙ ПОЛУАВТОМАТОМ А-547Р

тали держателя изолированы от токоведущих частей. Гибкий шланг состоит из двух спиралей, обтянутых тремя слоями медной токоведущей оплетки и установленных в общую резиновую трубку. Механизм подачи электродной проволоки малогабаритный, смонтирован вместе с катушкой для электродной проволоки в небольшом чемодане. Подача электродной проволоки осуществляется со скоростью 100—340 м/ч приводом от электродвигателя постоянного тока. Пульт управления полуавтомата находится на передней стенке выпрямителя ВС-300. Пульт управления имеет малогабаритный контактор КМ-400Д, реостат регулировки скорости подачи электродной проволоки, переключатель, амперметр, вольтметр и розетку для включения подогревателя газа. В трассовых условиях полуавтомат А-547Р может питаться от стационарного пункта электрогазового питания, который имеет источник сварочного тока и углекислотную рампу, состоящую из трех баллонов, эмеевиков, подогревателя газа и редуктора. Стационарный пункт СДАУ создан

на базе преобразователя ПГС-500 и может одновременно обслуживать два сварочных поста.

*Полуавтомат А-1230М* предназначен для сварки стальных магистральных трубопроводов и листовых конструкций в среде углекислого газа. Его устройство подобно полуавтомату А-547Р. Подающий механизм размещен в небольшом чемодане вместе с кассетой — катушкой для электродной проволоки. Механизм подачи проволоки размещают поблизости от свариваемого стыка. Подачу электродной проволоки осуществляют через редуктор со скоростью 140—670 м/ч. Изменять скорости подачи можно плавно с помощью реостата и ступенчато — при помощи сменных подающих роликов различного диаметра. Полуавтомат А-1230М рассчитан на применение проволоки диаметром 0,8—1,2 мм. Сварка может проводиться на максимальном токе 315 А с регулированием напряжения в пределах 16—24 В.

*Сварочный автомат СГУ-301* применяют для автоматической сварки поворотных стыков трубопроводов в среде углекислого газа. Он состоит из тележки, на которой смонтированы сварочная головка, механизм корректировки положения электрода, пульт управления и кассета с проволокой. Автомат удерживается на трубе с помощью штатива. Подача электродной проволоки и колебание газовой камеры осуществляются электродвигателем мощностью 100 Вт через редуктор. Механизм колебания электродной проволоки имеет эксцентрик, при помощи которого можно обеспечить амплитуду колебаний 0—6 мм. На пульте управления автоматом размещены следующие детали: реостаты для регулировки сварочного тока и скорости сварки, тумблер для включения силового контактора и электромагнитного газового клапана, тумблер для включения электродвигателя сварочной головки и выключатель для управления электродвигателем вращателя. Смещение электрода с зенита и поддержание требуемого уровня сварочной ванны обеспечивают вращением штурвала опорного штатива. Угол наклона электрода изменяется при помощи фиксатора, что позволяет приподнимать и откидывать сварочную головку для доступа к газовой камере и токоподводящему устройству. Автомат СГУ-301 предназначен для сварки труб тонкой проволокой диаметром 1,2 мм на токах до 300 А (источник питания — сварочный агрегат САУ-501) при скорости подачи электродной проволоки до 550 м/ч. Скорость сварки труб диаметром 89—273 мм может достигать 15—45 м/ч.

*Автомат ИК-6* предназначен для сварки на весу корневого слоя шва поворотных стыков труб в среде углекислого газа. Он смонтирован на четырехколесной тележке и состоит из механизма передвижения, механизма колебания и подачи проволоки, корректоров, кронштейнов с кассетой и пульта управления. Сварку труб диаметром 1220—1420 мм осуществляют

электродом диаметром 1,2 мм со скоростью 11—85 м/ч. Скорость подачи проволоки и скорость вращения секции регулируют при помощи реостатов, находящихся на пульте управления сварочного автомата. Сварочный автомат работает на токе до 500 А с напряжением на дуге до 40 В.

### СВАРКА НЕПОВОРОТНЫХ СТЫКОВ НА ТРАССЕ

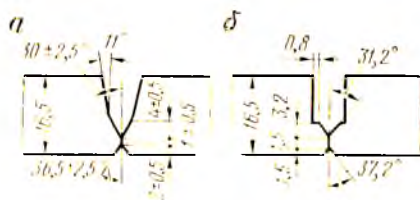
При сооружении магистральных трубопроводов в непрерывную нитку из отдельных труб или секций применяют полуавтоматическую или автоматическую сварку в среде углекислого газа. Для полуавтоматической сварки в среде углекислого газа отдельные трубы или секции раскладывают по трассе на инвентарные лежки и зачищают кромки. Трубы к месту сборки подают трубоукладчиком. Перед началом сборки на конец трубы устанавливают наружный центратор или вставляют в трубу внутренний. Следующую секцию или трубу подают трубоукладчиком и ее конец улавливают выступающей частью центратора. Зазор в стыке устанавливают равным 1,5—2,5 мм и выполняют прихватку кромок труб при помощи двух полуавтоматов. При сборке смещение кромок не должно превышать 3 мм на длине  $\frac{1}{4}$  окружности стыка. После сборки по всему периметру стыка накладывают 6—10 прихваток длиной не менее 60—80 мм в зависимости от диаметра трубопровода. Длина прихваток не ограничивается, так как они одновременно являются частью первого слоя шва. В зимних условиях прихватки могут быть заменены сваркой первого слоя шва полностью по всему периметру. После окончания сварки прихваток со стыка можно снять центратор в том случае, если диаметр труб небольшой и прочность прихваток достаточная, чтобы удерживать секцию без их разрыва. Сварку первого шва выполняют между прихватками те же сварщики-полуавтоматчики, которые накладывали прихватки в процессе центровки. Полуавтоматическую сварку ведут сверху вниз с опиранием держателя на кромки стыка. Первый слой шва накладывают при сварочном токе 160—220 А, напряжении на дуге 24—26 В, скорости подачи проволоки 210—260 м/ч.

Сварку заполняющего и облицовочного слоев выполняют поточно-расчлененным методом, и сварщики-полуавтоматчики находятся на таком же расстоянии один от другого, как и при ручной дуговой сварке. Заполняющие и облицовочные слои выполняют снизу вверх с поперечными колебаниями электродной проволоки. Автоматическую газозащитную сварку неповоротных стыков труб на трассе применяют с использованием поточно-расчлененного метода организации сварочных работ при температуре окружающего воздуха от +45 до —25 °С.

Технологический процесс автоматической сварки неповоротных стыков трубопроводов диаметром 1420 мм предусматривает следующие основные операции. Отдельные трубы или секции развозят (с опережением сварочных работ на 8—10 км) и раскладывают на деревянные лежки без разрывов под углом 15—20° к оси траншеи таким образом, чтобы к торцам труб был свободный доступ. Первая технологическая операция предусматривает изменение геометрии кромок труб (рис. 83) для увеличения производительности сварочных работ на 50 % и исключения операции по зачистке кромок перед сваркой. Обработку кромок производят непосредственно на бровке траншеи с помощью машины, оснащенной шестью резцами и щет-

Рис. 83. ОБРАБОТКА КРОМОК ТРУБ ДИАМЕТРОМ 1420 ММ ПЕРЕД СВАРКОЙ:

а — по технологии ВНИИСТА; б — по технологии фирмы «КРОУС»



ками. Зачистные машины подвешивают к трубоукладчику и перемещают от одной трубы к другой. Для подготовки кромок в сборочно-сварочной колонне используют две машины, каждую из которых обслуживают два оператора. Время обработки одного торца трубы составляет 4—6 мин. Для устойчивого оплавления вертикальных кромок при большой толщине стенок труб целесообразно проводить скос кромок углом 11° (рис. 83, а). После зачистки кромок на одном конце трубы закрепляют по шаблону металлическую ленту, по которой в дальнейшем перемещаются сварочные автоматы, обеспечивающие выполнение наружных слоев шва. Затем собирают стыки труб под сварку с помощью самоходного внутреннего пневматического или гидравлического центратора. Сборку выполняют без зазора. На этой операции используют два трубоукладчика. С помощью первого трубоукладчика центруют трубы, а второй с трубой выходит на исходную позицию. Первый слой, обеспечивающий надежный провар внутренних кромок стыка, выполняют одновременно шесть автоматов, которые устанавливают между рядами жимков внутреннего центратора. Каждый автомат сваривает 1/6 часть окружности стыка, начиная с зенита. Сварку ведут одновременно тремя автоматами, которые перемещаются из своих исходных позиций сверху вниз, обеспечивая наложение корневого шва одной половины окружности. После сварки левой половины окружности стыка другая группа автоматов заваривает через 10 с пра-



вую половину. Продолжительность цикла сварки внутреннего корневого слоя составляет 50—55 с. Звено сборки и сварки корневого шва состоит из восьми человек.

Сварочный процесс осуществляют тонкой электродной проволокой диаметром 1 мм при токе 200 А, напряжении на дуге 22 В и скорости сварки 73 см/мин. Для защиты зоны сварки применяют смесь аргона (75 %) и углекислого газа (25 %).

До окончания сварки корневого слоя шва начинают накладывать наружный слой двумя самоходными автоматами, перемещающимися по ранее установленной ленте сверху вниз. Каждый автомат заваривает половину окружности стыка на следующем режиме: сварочный ток 250—260 А, напряжение на дуге 22—24 В, скорость сварки 96 см/мин. В качестве защитной среды зоны сварки применяют углекислый газ. Звено сварки второго слоя шва состоит из двух сварщиков и подручного. После сварки второго слоя шва автоматы снимают с ленты и переносят к следующему стыку, а поверхность шва зачищают от брызг, окалины и шлака круглыми металлическими щетками и шлифовальными кругами. Сварку заполняющего третьего слоя ведут двумя автоматами, перемещающимися сверху вниз (от верхней точки стыка до нижней) с поперечными колебаниями электродной проволоки (сварочный ток 190 А, напряжение на дуге 19—21 В, скорость сварки 32 см/мин). Звено сварки заполняющего слоя состоит из четырех—пяти человек. Для обеспечения необходимого темпа сварочных работ заполняющие и облицовочный слои шва выполняют одновременно двумя автоматами. На левой половине стыка начинают сварку с положения 12 ч по циферблату часов и заканчивают в положении 6 ч. На правой половине сначала сваривают участок от 3 до 6 ч, а затем от 12 до 3 ч. После сварки заполняющего слоя двое рабочих зачищают поверхность шва. Число звеньев на заполняющем и облицовочном слое зависит от диаметра и толщины стенки трубы. Заключительной операцией является сварка облицовочного слоя. Автоматы, выполняющие облицовочный слой шва, устанавливают на ленты, которые после окончания сварки снимают. Сварку облицовочного слоя выполняют с поперечными колебаниями электродной проволоки (сварочный ток 160 А, напряжение на дуге 19—21 В и скорость сварки 17 см/мин).

Для предупреждения сдувания струи защитного газа ветром сварку заполняющего и облицовочного слоя выполняют в укрытии, которое выполнено в виде кабин из полиэтилена. Звено технического обслуживания обеспечивает ремонт и наладку сварочного оборудования и состоит из двух электриков и слесаря. Сборочно-сварочная бригада состоит из 29 человек (из них 14 сварщиков), что позволяет за час выполнить 9,4 стыка трубопровода диаметром 1420 мм с толщиной стенки 16,5 мм.

## **ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СВАРКИ НЕПОВОРОТНЫХ СТЫКОВ В СРЕДЕ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА**

Стационарный двухпостовой агрегат СДАУ-1 предназначен для газозлектрической сварки одновременно двумя полуавтоматами А-547Р, А-547У и др. Агрегат состоит из преобразователя ПСГ-500 и углекислотной рампы, установленной на общей раме. На углекислотной рампе устанавливают баллоны, эмевик, подогреватель газа и редуктор. При сварке можно применять одновременно три баллона, что позволяет избежать замерзания вентилей баллонов и полностью использовать имеющийся в баллоне углекислый газ.

### **Конструктивные особенности оборудования для автоматической сварки**

Для автоматической газозлектрической сварки неповоротных стыков магистральных трубопроводов диаметром 1420 мм в нашей стране разработан комплекс оборудования КГД-1421УЗ. В США подобное оборудование фирмы «КРОУС» применяют для сварки труб диаметром 520—1420 мм. Машина для обработки кромок фирмы «КРОУС» создана на базе внутреннего гидравлического центратора. Для обеспечения точной центровки имеются два ряда жимков, расположенных на расстоянии 800—1200 мм. На торце машины установлена планшайба с шестью резцовыми головками, которые приводятся во вращение с помощью гидродвигателя, а продольная подача планшайбы производится гидроцилиндрами. Работой машины управляют с помощью рукояток, установленных на передней панели машины. Резцовая головка работает совместно с роликом, который установлен в нижней ее части. Во время работы реза ролик катится по внутренней поверхности трубы, предотвращая деформацию кромки от усилия резания. Каждый резец обрабатывает определенную поверхность кромки. Внутренняя поверхность трубы зачищается металлическими щетками, установленными на резцовых головках. Машина для обработки кромок подвешивается на крюке трубоукладчика, и ее гидросистема питается от гидростанции, установленной на трубоукладчике. В отечественной практике для этой цели выпускают станки трех типов: СПК-81, СПК-121 и СПК-141 для обработки труб диаметром 800, 1220, 1420 мм.

Внутренний самоходный пневматический центратор имеет несколько сварочных головок фирмы «КРОУС», которые установлены между жимками центратора и выполняют сварку корневого шва. На конце центратора устанавливают штангу, внутри которой укладывают кабели для питания сварочных головок и привода управления. Центратор от стыка к стыку передвигается электродвигателем, который питается от аккумуля-

ляторных батарей. Сварочные головки подключают к генераторам разъемом, установленным на конце штанги. Сварочные головки устанавливают на общем кольце, и в процессе сварки они поворачиваются одновременно между жимками центра-тора. Каждая сварочная головка имеет механизм подачи электродной проволоки, систему подачи защитной среды, систему токоподвода и кассеты с электродной проволокой. Центратор устанавливают по упорам, которые автоматически выдвигают

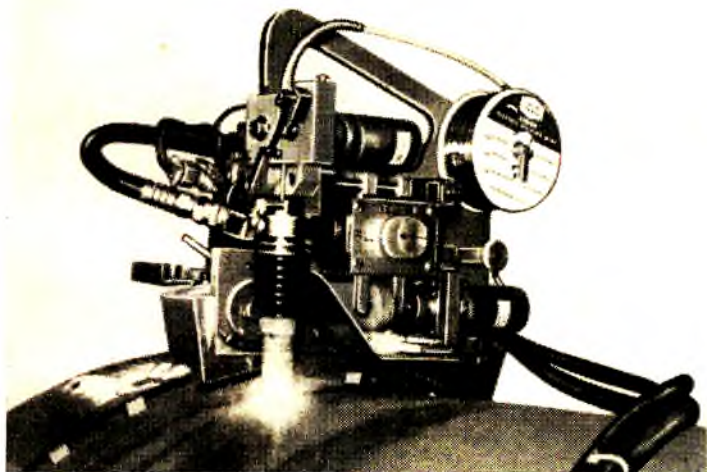


Рис. 84. АВТОМАТ ДЛЯ СВАРКИ НАРУЖНЫХ СЛОЕВ ШВА

ются при центровке. Питание сварочных головок осуществляется от двух- или трехпостовой сварочной установки, которая перемещается по трассе на самоходной гусеничной тележке. В нашей стране применяют самоходный гидравлический центратор со сварочными головками.

Автоматы для сварки наружных слоев шва (рис. 84) изготовляются из алюминиевых сплавов. Автомат перемещается по ленте из нержавеющей стали на четырех роликах. Привод осуществляется одним роликом через редуктор и электродвигатель. Ленту устанавливают на трубу с зазором 8—10 мм, который выдерживается с помощью двух рядов прокладок, устанавливаемых на расстоянии 80—100 мм друг от друга. Концы ленты соединяют разъемом, а натяжение ленты осуществляется винтом. Край ленты входит в пазы роликов, два из которых отводятся в сторону при установке и снятии автомата. На ленту устанавливают два автомата, которые начинают сварку с зенита.

Для сварки заполняющего и облицовочного слоев шва ис-

пользуют автоматы с колебаниями электродной проволоки, которые создаются кривошипно-шатунным механизмом от индивидуального электрического привода. В процессе сварки регулируют не сварочный режим, а только направление движения электрода вдоль разделки стыка.

Для питания автоматов сварочным током используют двухпостовые самоходные установки, на которых устанавливают углекислотные баллоны с газом, аккумуляторные батареи, питающие электродвигатели автоматов и генератор переменного тока. На установках имеется также генератор переменного тока, который используют для питания электроинструмента.

Защита сварочных постов от ветра обеспечивается переносным укрытием — палаткой, которое перемещается от стыка к стыку с помощью установки. Палатка подвешивается на подъемном устройстве вместе с автоматами и инструментом.

---

## Глава 10

### **АВТОМАТИЧЕСКАЯ СВАРКА ПОД ФЛЮСОМ И С ПРИНУДИТЕЛЬНЫМ ФОРМИРОВАНИЕМ ШВА**

Автоматическую сварку под флюсом широко применяют при строительстве магистральных трубопроводов, сферических и цилиндрических резервуаров и других подобных конструкций. Сварку под флюсом можно выполнять со *свободным формированием* шва, когда дуга горит внутри полости, ограниченной в верхней части оболочкой расплавленного шлака, а в нижней — поверхностью расплавленного металла (рис. 85). Эта полость заполнена парами флюса и металла с газами (в основном СО, частично водородом, азотом и др.) Давление этих газов поддерживает флюсовый свод над ванной. Конец электрода находится в непосредственной близости от переднего края ванны. По мере движения сварочной дуги вдоль изделия дуга отклоняется от вертикального положения в сторону, обратную направлению сварки. В эту же сторону отклоняются капли расплавленного металла при попадании в ванну. Капли расплавленного металла обволакиваются флюсом и смешиваются с основным металлом, оттесняясь давлением дуги к концу ванны. Жидкий металл находится в основном под действием давления дуги, собственного веса, веса находящегося над ванной флюса и силы поверхностного натяжения. Под действием давления дуги в основном металле образуется углубление (кратер) с тонким слоем расплавленного металла. В зависимости от изменения элементов сварочного режима изменяется глубина провара основного металла.

Форма сварных швов и форма проплавления (провара) характеризуются следующими основными параметрами: глубиной проплавления  $H$ ; высотой усиления сварного шва  $h$ ; шириной проплавления или шириной шва  $B$ ; коэффициентом формы провала  $\psi_{пр} = B/H$ ,  $\psi_{пр} = 0,5 \div 10$  (оптимальное его значение  $1,3-2$ ); коэффициентом полноты проплавления  $\mu_{пр} = F_{пр}/(HB)$  (где  $F_{пр}$  — площадь проплавления),  $\mu_{пр} = 0,6 \div 0,8$ ; коэффициентом формы валика  $\psi_{в} = B/h$ , а также коэффициентом полноты валика  $\mu_{в} = F_{в}/hB$ , где  $F_{в}$  — площадь наплавки.

Химический состав металла шва, его структура и механические свойства в известной мере регулируются составом основного и присадочного металлов, образующих шов. Доля участия

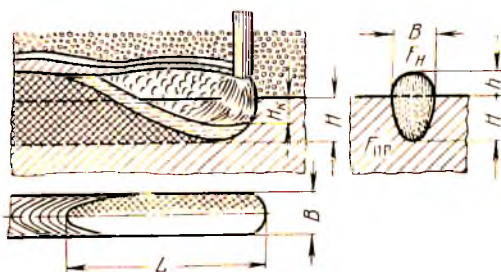


Рис. 85. СХЕМА ОБРАЗОВАНИЯ СВАРНОГО ШВА ПРИ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКЕ ПОД ФЛЮСОМ С ГОРЕНИЕМ ДУГИ ПОД ФЛЮСОМ

основного металла  $\gamma_0$  характеризуется отношением площади проплавления основного металла к площади всего сварного шва:  $\gamma_0 = F_{пр}/(F_{пр} + F_{в})$ . Величина  $\gamma_0$  может изменяться в зависимости от типа шва, режима нагрева и техники сварки. В обычных условиях сварки  $\gamma_0 = 60 \div 70 \%$ , а при двудуговой сварке стыковых швов на большой скорости  $\gamma_0 = 80 \div 85 \%$ .

При свободном формировании поверхности шва металл и шлак обладают большой жидкотекучестью, поэтому шов должен занимать горизонтальное положение или отклоняться от него не более чем на  $10^\circ$ .

Сварка с *принудительным формированием шва* позволяет выполнять швы в пространственных положениях, которые отличаются от горизонтального (в вертикальном, потолочном и т.п.). Для этого расплавленный металл и шлак охлаждаются с помощью искусственного теплоотвода. В этом случае на поверхности шва образуется слой охлажденного металла и шлака, который препятствует растеканию сварочной ванны. Эта ванна удерживается в требуемом пространственном положении с помощью медных водоохлаждаемых ползунов, которые перемещаются вместе с ней по стыку. Метод принудительного формирования шва применяют для сварки неповоротных стыков трубопроводов, сферических резервуаров и вертикальных стыков цилиндрических резервуаров.



## ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ РЕЖИМА СВАРКИ ПОД ФЛЮСОМ НА ФОРМУ СВАРНЫХ ШВОВ

Изменение режима сварки и других технологических факторов оказывает влияние на размеры сварных швов.

*Сварочный ток* определяет в значительной мере форму шва. С увеличением сварочного тока возрастает количество тепла, вводимого в изделие, что вызывает увеличение объема сварочной ванны. Количество расплавленного электродного металла можно определить по формуле  $G_{\text{п}} = I \alpha_{\text{п}} t$ , где  $I$  — сварочный ток;  $\alpha_{\text{п}}$  — коэффициент наплавки;  $t$  — время горения сварочной дуги. Так как  $G_{\text{п}} = F_{\text{п}} \rho l$  (где  $F_{\text{п}}$  — площадь поперечного сечения наплавленного металла;  $\rho$  — плотность металла;  $l$  — длина шва), то, приравнявая выражения и выполняя необходимые преобразования, получаем

$$I = \rho F_{\text{п}} v_{\text{св}} / \alpha_{\text{п}}, \quad (22)$$

где  $v_{\text{св}}$  — скорость сварки,  $v_{\text{св}} = l/t$ . Формула (22) устанавливает зависимость между сварочным током и скоростью сварки. С увеличением сварочного тока возрастает и давление дуги на поверхность жидкой ванны. Благодаря этому расплавленный металл более интенсивно оттесняется из-под электрода и сварочная дуга углубляется в основной металл, ширина шва возрастает незначительно. Глубина проплавления  $H$  основного металла повышается и находится в прямой зависимости от тока  $H = kI$ , где  $k$  — коэффициент пропорциональности (табл. 14).

Таблица 14

ЗНАЧЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА  $k$  В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ТОКА,  
МАРКИ ФЛЮСА И ДИАМЕТРА ЭЛЕКТРОДА

| Марка<br>флюса или<br>защитный<br>газ | Диаметр<br>провода, мм | $k$ , мм 100 А    |                           |                             | Марка<br>флюса или<br>защитный<br>газ | Диаметр<br>провода, мм | $k$ , мм/100 А    |                           |                             |
|---------------------------------------|------------------------|-------------------|---------------------------|-----------------------------|---------------------------------------|------------------------|-------------------|---------------------------|-----------------------------|
|                                       |                        | Переменный<br>ток | Постоянный<br>ток         |                             |                                       |                        | Переменный<br>ток | Постоянный<br>ток         |                             |
|                                       |                        |                   | прямая<br>поляр-<br>ность | обратная<br>поляр-<br>ность |                                       |                        |                   | прямая<br>поляр-<br>ность | обратная<br>поляр-<br>ность |
| ОСЦ-45                                | 3                      | 1,15              | 0,95                      | 1,3                         | АН-22                                 | 3                      | —                 | 1,29                      | 1,38                        |
|                                       | 4                      | 1,05              | 0,85                      | 1,15                        |                                       | 4                      | —                 | 1,18                      | 1,31                        |
|                                       | 5                      | 0,95              | 0,75                      | 1,1                         |                                       | 5                      | —                 | 1,07                      | 1,21                        |
| АН-348А                               | 3                      | 1,1               | 0,95                      | 1,25                        | Углекис-<br>лый газ                   | 1,2                    | —                 | —                         | 2,1                         |
|                                       | 4                      | 1                 | 0,9                       | 1,1                         |                                       | 1,6                    | —                 | —                         | 1,75                        |
|                                       | 5                      | 0,95              | 0,85                      | 1,05                        |                                       | 2                      | —                 | —                         | 1,55                        |

При увеличении сварочного тока объем расплавляемого электродного металла увеличивается, что способствует увеличению высоты усиления  $h$ . В этом случае может образоваться

резкий переход от наплавленного металла к основному, что снижает работоспособность сварных соединений, особенно при ударных и знакопеременных нагрузках. Увеличение высоты усиления выше определенного предела ухудшает поверхность шва и затрудняет отделяемость шлаковой корки. Для большинства сварных соединений нижний предел коэффициента формы провара  $\psi_{\text{пр}}$  ограничивается значением 1. Поэтому при переходе на сварку большими токами для соблюдения оптимальных значений коэффициента формы шва повышают напряжение сварочной дуги.

*Напряжение на дуге* оказывает большое влияние на форму шва, а также на долю участия основного металла в металле шва. Напряжение на дуге зависит от длины дуги и состава дуговых газов. Для дуги, горящей под флюсом, справедливо уравнение  $U = a + bl$ , где  $a$  — падение напряжения на аноде и катоде;  $b$  — падение напряжения на единицу длины столба дуги;  $l$  — длина дуги. С увеличением напряжения возрастает тепловая мощность дуги, что приводит к увеличению размеров сварочной ванны, особенно ее ширины и длины. Ширина ванны связана с напряжением практически прямой зависимостью

$$B = kIU/(v_{\text{св}}s),$$

где  $s$  — толщина проплавляемого металла.

При повышении напряжения на дуге швы получаются с малой высотой усиления и небольшой глубиной проплавления. Поэтому для выполнения облицовочных слоев стыков трубопроводов и резервуаров сварку ведут чаще с повышенным напряжением.

*Род и полярность тока* определяют в значительной мере глубину и ширину провара, что связано с выделением различного количества теплоты. Если приблизительно оценить теплоту, выделяющуюся на аноде  $W_a$  и катоде  $W_k$  по эффективному падению напряжения, то получим зависимости

$$W_a = U_a + (\varphi + 2kT); \quad W_k = U_k - (\varphi + 2kT),$$

где  $U_a$  и  $U_k$  — анодное и катодное падение напряжений;  $\varphi$ ,  $kT$  — потенциальная и термическая энергия электронов.

Обычно на катоде не вся энергия  $U_k$  переходит в теплоту, так как часть ее  $(\varphi + 2kT)$  перераспределяется в плазму столба дуги. На аноде выделяется энергия  $U_a$  вместе с потенциальной и термической энергиями электронов. Количество теплоты, выделяемое на катоде, зависит от потенциала ионизации дугового газа. Поэтому разница в тепловыделении на катоде и аноде определяется способом дуговой сварки.

Практически при сварке на постоянном токе обратной полярности глубина провара на 40 % больше, чем глубина провара при сварке постоянным током прямой полярности. При сварке переменным током глубина провара на 15—20 % меньше.

чем глубина провара при обратной полярности. Применение автоматической сварки под флюсом постоянным током прямой полярности позволяет увеличить производительность расплавления электродной проволоки. Ширина шва при сварке на переменном токе получается меньше, чем ширина при сварке на постоянном токе обратной полярности, и больше, чем при сварке током прямой полярности. Сварку трубопроводов выполняют, как правило, на постоянном токе и полярность выбирают в зависимости от марки флюса и конкретных условий формирования шва.

*Скорость сварки* оказывает влияние на положение столба дуги по отношению к поверхности сварочной ванны, что способствует изменению формы шва. При постоянной погонной энергии увеличение скорости сварки позволяет повысить термический к. п. д. процесса, что приводит к увеличению глубины проплавления и уменьшению ширины шва. Изменение скорости сварки при постоянной тепловой мощности дуги влияет на размеры сварочной ванны, что видно из уравнения длины  $L$  сварочной ванны

$$L = k (UI)^2 / (v_{св} s^2).$$

С увеличением скорости сварки ширина проплавления непрерывно падает, причем в относительно больших размерах, чем глубина проплавления. Поэтому коэффициент формы провара шва с увеличением скорости сварки снижается, но доля участия основного металла в шве непрерывно растет.

При постоянном сварочном токе *диаметр электрода* определяет плотность тока в пятне нагрева и подвижность дуги. Форма шва зависит от диаметра электродной проволоки, и при уменьшении диаметра электрода уменьшается ширина шва и увеличивается глубина проплавления основного металла.

*Влияние углов наклона электрода и изделия на форму шва.* Заданную форму шва можно получить не только изменением режима сварки, но и применением некоторых технологических приемов, например изменением наклона электрода или изделия по отношению к горизонту каждого в отдельности или совместно. Электрод по отношению к изделию может занимать вертикальное положение или иметь наклон: углом вперед или углом назад. В зависимости от наклона изделия сварку выполняют «на подъем» или «на спуск». При сварке углом назад большой наклон столба дуги способствует усилению вытеснения жидкого металла и некоторому увеличению глубины проплавления. При сварке углом вперед столб дуги располагается над поверхностью основного металла, увеличивая под собой слой жидкого металла. Вытеснение жидкого металла и образование кратера происходят под действием вертикальной составляющей давления дуги. Эта составляющая изменяется пропорционально синусу угла наклона электрода  $\alpha$ , глубина про-

плавления изменяется аналогично. Наибольшая глубина проплавления наблюдается при угле  $90^\circ$ . Уменьшение угла  $\alpha$  приводит к уменьшению глубины проплавления. При сварке кольцевых стыков магистральных трубопроводов на форсированных режимах угол  $\alpha$  достигает  $40^\circ$ .

Глубина проплавления несколько увеличивается при сварке на подъеме вследствие уменьшения разности уровней жидкого металла в кратере и в задней части ванны. В то же время ширина проплавления уменьшается.

Сварка на спуск создает условия для подтекания жидкого металла под дугу, что приводит при большом угле наклона изделия к меньшей глубине проплавления и большей ширине шва.

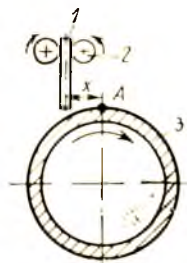


Рис. 86. СМЕЩЕНИЕ ЭЛЕКТРОДА С ЗЕНИТА:

1 — электрод; 2 — подающий механизм; 3 — труба

*Влияние конструктивных факторов на форму шва.* Исследовательскими работами было показано, что форма проплавления основного металла практически не зависит от соединения и типа шва, а также от параметров разделки кромок. Поэтому форма проплавления основного металла определяется в основном режимом сварки, т. е. сварочным током, напряжением на дуге, скоростью сварки. Тип шва и соединения, а также параметры разделки кромок определяют форму усиления шва, долю участия основного металла в сварном шве, в некоторой степени создают пределы для формы проплавления. Для угла между свариваемыми кромками в  $90^\circ$

(стыковое и тавровое соединения) при условии получения полного проплавления корня шва коэффициент формы провара  $\psi_{пр}$  должен быть не больше 2, а для угла  $60^\circ$   $\psi_{пр} = 1,73$  и т. д. Верхний предел  $\psi_{пр}$  для данных соединений ограничивают с целью обеспечения полного проплавления корня шва. Поэтому при малых углах скоса кромок между деталями устанавливают определенный зазор, который позволяет получить требуемое проплавление корня шва. Кроме этого, применяют специальный тип разделки кромок (например, U-образную разделку) или необходимые технологические приемы (первый слой шва выполняют меньшим диаметром электрода).

Зазор, угол скоса кромок и глубина разделки определяют в основном форму усиления и долю участия основного металла в сварном шве для каждого режима сварки. Следовательно, чем больше зазор, угол скоса кромок и глубина разделки, тем меньше усиление шва и доля участия основного металла в шве.

*Смещение электрода* относительно верхней точки  $A$  окружности стыка (зенита) при сварке трубопроводов (рис. 86) влияет на качество сварных соединений. Если смещение  $x$  будет большим, то возможен непровар или зашлакование корня шва,

а также стекание металла. Недостаточное смещение электрода с зенита при наложении второго слоя шва может привести к прожогам. Смещение  $x$  устанавливается опытным путем по внешнему виду шва и находится в пределах 40—100 мм. Смещение электрода с зенита связано с производительностью процесса, так как длина сварочной ванны  $L$  зависит от мощности дуги:  $L = kUI$ , где  $k$  — коэффициент пропорциональности,  $k = 2,8 \div 3,6$  мм/(кВ·А) — для сварки под флюсом,  $k = 1,7 \div 2,3$  мм/(кВ·А) — для сварки открытой дугой;  $U$  — напряжение на дуге;  $I$  — сварочный ток. Увеличение тока и напряжения приводит к увеличению сварочной ванны, что влияет на смещение электрода. При сварке труб небольших диаметров нельзя применять большие ток и скорость сварки.

**Вылет электрода** — это участок плавящегося электрода от конца мундштука до дуги. Увеличение вылета электрода приводит к возрастанию активного сопротивления в сварочной цепи. Электрод в этом случае нагревается джоулевым теплом и теплом сварочной дуги. При сварке проволокой небольшого диаметра (менее 3 мм) отклонение вылета электрода от заданной величины не должно превышать  $\pm 5 \div 10$  мм, так как существенно изменяется глубина проплавления и форма шва. Увеличение вылета электрода позволяет, не изменяя тока, повысить скорость подачи проволоки, что приводит к увеличению количества наплавленного металла и уменьшению глубины проплавления. При небольшом вылете электрода может подгореть наконечник токоподводящего мундштука, при большом вылете сварочный шов получается неровным.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ РЕЖИМОВ СВАРКИ ПОД ФЛЮСОМ

Приведенные данные режимов сварки стыковых соединений трубопроводов в табл. 15 составлены на основании большого числа опытов, но они не позволяют в общем виде представить связь между параметрами режима сварки и размерами швов. Поэтому для практических целей существуют приближенные схемы расчета режимов сварки, обеспечивающих получение швов определенных размеров, исходя из действия точечного быстродвижущегося источника тепла. Квадрат расстояния до изотермы плавления определяют по формуле

$$r^2 = 2q_{\text{п}} / (\pi \epsilon_{\text{ср}} T_{\text{пл}}).$$

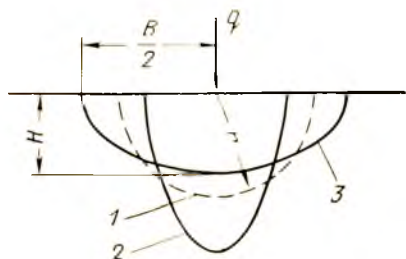
Площадь, ограниченная той или иной изотермой в поперечном сечении, представляет собой полуокружность радиуса  $r$  (рис. 87, кривая 1), которую можно определить по формуле

$$F_{\text{пр}} = \frac{\pi r^2}{2} = \frac{\pi}{2} \cdot \frac{2q_{\text{п}}}{\pi \epsilon_{\text{ср}} T_{\text{пл}}} = \frac{q_{\text{п}}}{\epsilon_{\text{ср}} T_{\text{пл}}}, \quad (23)$$



где  $q_n$  — погонная энергия;  $e$  — основание натурального логарифма;  $c$  — удельная теплоемкость металла;  $\rho$  — плотность металла;  $T_{пл}$  — температура плавления металла.

Фактическая форма провара при автоматической и полуавтоматической сварке отличается от полуокружности. При сварке на больших токах и низких напряжениях  $\psi_{пр} < 2$  (кривая 2, рис. 87), а при сравнительно небольших токах и высоких напряжениях  $\psi_{пр} > 2$  (рис. 87, кривая 3). Фактическая форма провара, по допущениям В. И. Дятлова, имеет полуэллипс, площадь которого равна площади полуокружности, определенной по формуле (23). Площадь полуэллипса, одна из полуосей которого равна  $B/2$ , а другая —  $H$ , можно определить как



$$F_{пр} = \pi \frac{B}{2} \frac{H}{2} = \frac{\pi}{2} \frac{B}{H} \frac{H^2}{2} = \frac{\pi \psi_{пр} H^2}{4}. \quad (24)$$

Приравнивая правые части уравнения (23) и (24), найдем глубину провара

$$H = 2 \sqrt{\frac{q_n}{\pi \rho T_{пл} \psi_{пр}}} = A \sqrt{q_n / \psi_{пр}}$$

Рис. 87. ФОРМЫ ПЛОЩАДЕЙ ПРОВАРА

Для низкоуглеродистых и низколегированных сталей при сварке под флюсом низкоуглеродистой проволокой  $A = 0,0156$

$$H = 0,0156 \sqrt{q_n / \psi_{пр}}. \quad (25)$$

При сварке в среде углекислого газа низкоуглеродистых и низколегированных сталей применяют проволоки марок Св-08ГС и Св-08Г2С. Глубину провара  $H$  принимают с коэффициентом  $A = 0,0165$

$$H = 0,0165 \sqrt{q_n / \psi_{пр}}.$$

Погонная энергия  $q_n = IU \eta_n / v_{сн}$ .

По экспериментальным данным, коэффициент формы провара

$$\psi_{пр} = k' (19 - 0,01 I) d U / I,$$

где  $k'$  — коэффициент, зависящий от рода тока и полярности;  $d$  — диаметр электродной проволоки.

Для плотности тока  $j < 120$  А/мм<sup>2</sup> и обратной полярности  $k' = 0,367 j^{0,1925}$ ; при сварке постоянным током прямой полярности  $k' = 2,82 / j^{0,1925}$ . При  $j \geq 120$  А/мм<sup>2</sup> коэффициент  $k'$  остается неизменным (для постоянного тока обратной полярности  $k' = 0,92$ , прямой полярности  $k' = 1,12$ , для переменного тока  $k' = 1$ ).

## РЕЖИМЫ ПОВОРОТНОЙ СВАРКИ ТРУБ ПОД СЛОЕМ ФЛЮСА

| Диаметр<br>труб, мм | Толщина<br>стенки<br>трубы, мм | Слой | Диаметр<br>электрод-<br>ной про-<br>водки, мм | Напря-<br>жение на<br>дуге, В | Свароч-<br>ный ток,<br>А | Скорость<br>сварки,<br>м/ч | Вылет<br>электро-<br>да, мм | Смещение<br>с зенита,<br>мм | Угол наклона<br>электрода, градус           |
|---------------------|--------------------------------|------|-----------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|---------------------------------------------|
| 529                 | 7—8                            | I    | 2                                             | 40—42                         | 400—480                  | 30—35                      | 30—35                       | 40—45                       | Электрод установлен<br>вертикально<br>То же |
|                     |                                | II   |                                               | 42—45                         | 440—480                  | 30—35                      | 30—35                       | 40—45                       |                                             |
| 720                 | 8—9                            | I    | 2                                             | 42—45                         | 400—450                  | 38—40                      | 30—35                       | 60—80                       | »                                           |
|                     |                                | II   |                                               | 48—50                         | 400—480                  | 38—40                      | 30—35                       | 40—50                       |                                             |
| 820                 | 9                              | I    | 2                                             | 40—45                         | 400—480                  | 35—40                      | 30—35                       | 60—80                       | »                                           |
|                     |                                | II   |                                               | 48—50                         | 480—500                  | 38—40                      | 30—35                       | 40—50                       |                                             |
|                     |                                | I    | 3                                             | 46—48                         | 550—650                  | 60—65                      | 40                          | 40—60                       | »                                           |
|                     |                                | II   |                                               | 48—50                         | 680—750                  | 55—65                      | 40                          | 30—40                       |                                             |
| 1020                | 11—12                          | I    | 2                                             | 45—47                         | 400—420                  | 30—35                      | 30—35                       | 60—80                       | »                                           |
|                     |                                | II   |                                               | 48—50                         | 500—580                  | 40—45                      | 30—35                       | 40—50                       |                                             |
|                     |                                | I    | 3                                             | 46—48                         | 580—650                  | 55—60                      | 40                          | 60—80                       | »                                           |
|                     |                                | II   |                                               | 48—50                         | 680—750                  | 50—55                      | 40                          | 40—60                       |                                             |
|                     |                                | I    | 3 *                                           | 44—46                         | 750—800                  | 65—70                      | 40                          | 60—80                       | До 30                                       |
|                     |                                | II   |                                               | 48—50                         | 800—850                  | 55—60                      | 40                          | 40—60                       |                                             |

\* Данные, рекомендованные для форсированных режимов.

| Диаметр<br>труб, мм | Толщина<br>стенки<br>трубы, мм | Слой              | Диаметр<br>электрод-<br>ной про-<br>волоки,<br>мм | Напря-<br>жение на<br>дуге, В | Свароч-<br>ный ток,<br>А | Скорость<br>сварки,<br>м/ч | Вылет<br>электро-<br>да, мм | Смещение<br>с зенита,<br>мм | Угол наклона<br>электрода, градус                                                                  |
|---------------------|--------------------------------|-------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------|--------------------------|----------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1220                | 12,5                           | I                 | 2                                                 | 44—48                         | 400—420                  | 30—35                      | 30—35                       | 60—80                       | Электрод установлен<br>вертикально<br>До 5<br>До 5<br>До 5<br>До 5<br>До 5<br>До 5<br>До 5<br>До 5 |
|                     |                                | II                | 3                                                 | 48—50                         | 500—550                  | 35—40                      | 30—35                       | 40—60                       |                                                                                                    |
|                     |                                | I                 |                                                   | 44—48                         | 540—580                  | 40—45                      | 40                          | 80—100                      |                                                                                                    |
|                     |                                | II                | 3 *                                               | 48—52                         | 560—600                  | 35—40                      | 40                          | 60—80                       |                                                                                                    |
|                     |                                | I                 |                                                   | 42—46                         | 640—720                  | 50—60                      | 40                          | 80—100                      |                                                                                                    |
|                     |                                | II                |                                                   | 48—50                         | 720—800                  | 50—55                      | 40                          | 60—80                       |                                                                                                    |
|                     |                                | I                 |                                                   | 42—46                         | 640—720                  | 45—50                      | 40                          | 80—100                      |                                                                                                    |
|                     |                                | II                |                                                   | 44—48                         | 700—750                  | 45—50                      | 40                          | 80—100                      |                                                                                                    |
|                     |                                | III               |                                                   | 48—52                         | 750—800                  | 40—45                      | 40                          | 60—80                       |                                                                                                    |
|                     |                                |                   |                                                   |                               |                          |                            |                             |                             |                                                                                                    |
| 1420                | 16,5—20,5                      | I                 | 3                                                 | 44—46                         | 750—800                  | 50—55                      | 40—50                       | 60—100                      | До 30                                                                                              |
|                     |                                | II и другие       |                                                   | 45—47                         | 800—850                  | 50—55                      | 40—50                       | 40—80                       | До 30                                                                                              |
|                     |                                | облицовоч-<br>ные |                                                   | 46—48                         | 850—900                  | 45—500                     | 40—50                       | 40—80                       | До 30                                                                                              |

Примечание. Корневой слой выполняют ручной или полуавтоматической сваркой в среде углекислого газа.

\* Данные, рекомендованные для форсированных режимов.

Ширину шва определяют по формуле  $B = \psi_{\text{пр}} H$ . Для определения высоты усиления сварного шва  $h$  рассчитывают площадь поперечного сечения наплавленного металла, используя формулу

$$v_{\text{св}} = \alpha_{\text{н}} I / (3600 \rho F_{\text{н}}),$$

значения  $\alpha_{\text{н}}$  и  $v_{\text{св}}$  принимают по экспериментальным данным (рис. 88), а также из расчета. Для сварки под флюсом ввиду

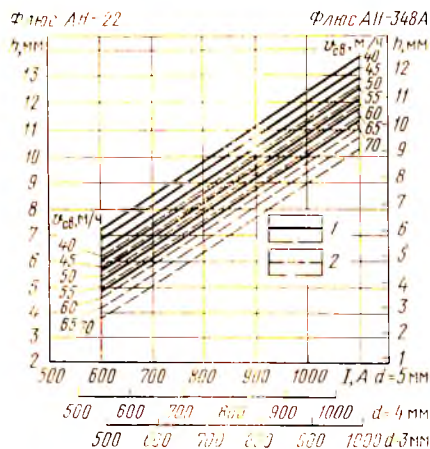


Рис. 88. НОМОГРАММА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЛУБИНЫ ПРОПЛАВЛЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ ПОД ФЛЮСОМ ТОКОМ ОБРАТНОЙ (1) И ПРЯМОЙ (2) ПОЛЯРНОСТИ

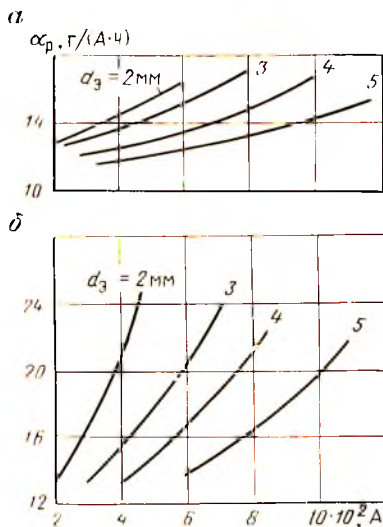


Рис. 89. ЗАВИСИМОСТЬ  $\alpha_{\text{р}}$  ОТ РЕЖИМОВ СВАРКИ:

$a$  — постоянный ток обратной полярности;  
 $b$  — постоянный ток прямой полярности

незначительных потерь принимают, что коэффициент наплавки  $\alpha_{\text{н}}$  равен коэффициенту расплавления  $\alpha_{\text{р}}$  (рис. 89). Коэффициент расплавления  $\alpha_{\text{р}}$  имеет две составляющие:  $\alpha_{\text{р}} = \alpha_{\text{р}}' + \Delta\alpha_{\text{р}}$ , где  $\alpha_{\text{р}}'$  — составляющая коэффициента расплавления, обусловливаемая тепловложением дуги;  $\Delta\alpha_{\text{р}}$  — составляющая коэффициента расплавления, зависящая от тепловложения вследствие предварительного нагрева вылета электрода протекающим током. При сварке постоянным током обратной полярности удельное количество теплоты, выделяющееся в приэлектродной области, изменяется в небольших пределах, поэтому составляющая коэффициента расплавления  $\alpha_{\text{р}}' = 11,6 \pm 0,4$ . При сварке постоянным током прямой полярности и переменным током  $\alpha_{\text{р}}' = A + CI$ , где  $A$  и  $C$  — коэффициенты. При подстановке экспериментальных значений  $A$  и  $C$  в формулу составляющей коэф-

коэффициента расплавления при сварке постоянным током прямой полярности будем иметь

$$\alpha'_p = 6,3 + \frac{70,2 \cdot 10^{-3}}{d_3^{1,035}} I;$$

при сварке переменным током

$$\alpha'_p = 7,0 + \frac{70,2 \cdot 10^{-3}}{d_3^{1,35}} I.$$

Вторую составляющую коэффициента расплавления рассчитывают по формуле

$$\Delta \alpha_p = 3600 Q_n / q_3 I,$$

где  $Q_n$  — количество теплоты, расходуемое на предварительный подогрев протекающим током вылета электродной проволоки;  $q_3$  — количество теплоты, необходимое для расплавления 1 г электродной проволоки (для низкоуглеродистых проволок  $q_3 = 2$  кДж/г).

Значение  $Q_n$  определяют из уравнения

$$Q_n = 0,1884 j^2 \rho_0 d_3^2 \left[ \frac{v_3}{\alpha \beta} (e^{-p_2 H} - 1) - \frac{\alpha (T_n - T_0)}{\rho_1} \right],$$

где  $j$  — плотность тока в электроде, А/см<sup>2</sup>;  $\rho_0$  — удельное сопротивление проволоки при 0 °С (для низкоуглеродистой проволоки  $\rho_0 = 14 \cdot 10^{-6}$  Ом·см);  $d_3$  — диаметр электродной проволоки, см;  $v_3$  — скорость подачи проволоки, см/с;  $\alpha$  — коэффициент температуропроводности, см<sup>2</sup>/с;  $\alpha$  — температурный коэффициент электрического сопротивления (для низкоуглеродистой стали  $\alpha \approx 0,0083$  °С<sup>-1</sup>);  $\beta$  — коэффициент, равный  $j^2 \rho_0 / (a c \rho)$ ;  $c$  — удельная теплоемкость, Дж/(г·°С);  $\rho$  — плотность, г/см<sup>3</sup>;  $H$  — вылет электрода, см;  $T_n$  — температура плавления проволоки;  $T_0$  — начальная температура проволоки;  $\rho_1$  и  $\rho_2$  — коэффициент

$$p_{1,2} = -\frac{v_3}{2a} \pm \sqrt{\frac{v_3^2}{4a} - \alpha \beta}.$$

При сварке в среде защитных газов коэффициент наплавки отличается от коэффициента расплавления в связи с потерей электродного металла:  $\alpha_n = \alpha_p (1 - \psi)$ , где  $\psi$  — коэффициент потерь,  $\psi = 1 - G_n / G_p$ ,  $G_n$  — масса металла, теряемого в виде брызг и угара;  $G_p$  — масса расплавленного электродного металла.

Ожидаемую среднюю величину коэффициента потерь при сварке в среде углекислого газа (плотность тока 60—320 А/мм<sup>2</sup>) определяют по формуле

$$\psi = -4,72 + 17,6 \cdot 10^{-2} j - 4,48 \cdot 10^{-4} j^2.$$



Площадь наплавленного металла при сварке стыковых соединений без разделки кромок  $F_n = B h \mu_v$ , где  $\mu_v$  — коэффициент полноты валика, выражающий отношение площади сечения наплавленного металла к площади прямоугольника, основание и высота которого равны ширине и высоте валика. Экспериментально установлено, что  $\mu_v = 0,73$ , поэтому  $h = F_n / (0,73 B)$ . Площадь поперечного сечения шва определяют по формуле

$$F_n = \alpha_p (1 - \psi) / (\rho v_{св}) \text{ и } F_n v_{св} \approx F_3 v_3.$$

При наличии зазора и разделки кромок определяют общую высоту шва  $C = H + h$ . В этом случае высоту усиления находят из формулы

$$h = (F_n - h_1^2 \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} - Cb) / (0,73B - b),$$

где  $h_1$  — высота разделки (размер от поверхности листа до приотупления);  $\alpha$  — угол разделки кромок;  $b$  — сварочный зазор между листами или трубами.

Приведенную методику расчета режимов автоматической сварки под флюсом можно применять для низколегированных сталей. Однако эта методика не учитывает влияния химического состава основного и наплавленного металла на свойства и сопротивляемость образованию трещин. При определении режимов сварки для сталей, склонных к образованию трещин, необходимо проводить расчет с учетом скорости охлаждения сварного соединения.

## **СПОСОБЫ ВЫПОЛНЕНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ПОД ФЛЮСОМ**

При автоматической сварке под флюсом стыковые швы трубопроводов и листовых конструкций выполняют односторонними и двусторонними. Сварку стыков можно выполнять как с разделкой кромок, так и без нее. Разделку кромок можно заменить необходимым зазором в стыке. Односторонние и двусторонние швы выполняют односторонними и многосторонними. Для обеспечения нормального провара и предохранения от протекания жидкого металла через зазор стыковые швы выполняют на флюсовой подушке, на медной или флюсомедной подкладке, на остающейся или временной монтажной подкладке, с подваркой корня шва, а также на весу.

### **Односторонняя многосторонняя сварка трубопроводов**

Одностороннюю многостороннюю сварку с ручной подваркой корня шва применяют при сооружении магистральных трубопроводов. Корневой слой шва выполняют на месте центровки

и сборки труб — трубосварочной линии или сборочном кондукторе. Стыки собирают с зазором, который для электродов с основным покрытием составляет 2—3,5 мм, а для электродов с целлюлозным покрытием — 1,5—2,5 мм. Сварку первого слоя выполняют чаще снаружи трубы в поворотном или неповоротном положении. Первый слой шва, во избежание получения прожогов при автоматической сварке под флюсом, должен иметь толщину не менее 4 мм, а в местах с увеличенным зазором (более 3 мм) и при смещении кромок стыка — не менее 5 мм. При сооружении магистральных трубопроводов из низколегированных сталей с пределом прочности до 530 МПа для сварки первого (корневого) слоя шва применяют электроды с целлюлозным покрытием марки ВСЦ-4 диаметром 4 мм или электроды с основным покрытием марки УОНИ-13/55 диаметром 3—3,25 мм. При сварке труб из сталей  $\sigma_b > 530$  МПа первый слой выполняют электродами марки ВСЦ-4А. Трубы из сталей повышенной и высокой прочности перед сваркой корневого слоя шва предварительно подогревают. Первый заполняющий слой накладывают при помощи автоматической сварки под флюсом по корневому слою. Толщину заполняющего слоя выбирают с учетом толщины корневого слоя, так как при сварке на повышенном режиме корневой слой можно прожечь мощной дугой. Глубину проплавления  $H$  определяют в соответствии с формулой (25). Число слоев автоматической сварки устанавливают в зависимости от толщины стенки трубы. Для стенки толщиной 12,5 мм автоматическую сварку выполняют в два слоя, при большей толщине стенки — не менее чем в три слоя.

Сварку труб диаметром 1020—1420 мм с толщиной стенки до 20 мм, изготовленных из низколегированных высокопрочных сталей, выполняют с гарантированным проваром корня шва. Для этого выполняют внутреннюю подварку корня шва как электродами, так и автоматической сваркой под слоем флюса. При ручной подварке стык собирают с указанным зазором и подварку выполняют тотчас после завершения сварки корня шва. Если автоматическую подварку выполняют тотчас после сварки корня шва, то стык собирают без зазора и сваривают корневой шов без обязательного провара. После этого автоматом под слоем флюса подваривают корень шва внутри трубы. В этом случае разделку кромок труб выполняют с меньшими углами, что требует меньшего количества присадочного металла и исключается прожог при сварке заполняющих слоев. Подварку корня шва выполняют и как завершающую операцию после полной сварки стыка. Такая подварка гарантирует полный провар корня шва и устраняет дефекты несплавления первого слоя с корневым.

На выбор оптимального режима сварки заполняющих слоев шва оказывают значительное влияние толщина корневого слоя, род тока и его полярность, свойства сварочных материалов,

особенно марка флюса в сочетании со сварочной проволокой и т. п.

Автоматическую сварку под флюсом АН-348А стыков труб из малоуглеродистых сталей ( $\sigma_b < 550$  МПа), целесообразно производить с применением электродной проволоки Св-08А, Св-08АА. Все заполняющие слои шва выполняют последовательно один за другим электродом диаметром 2—3 мм. При многослойной сварке поворотных стыков трубопроводов последний (верхний) слой является облицовочным. После наложения каждого слоя шлак удаляют с помощью ручного ударного инструмента. Первый слой при сварке под флюсом накладывают таким образом, чтобы корневой слой мог быть переплавлен на достаточную глубину, а остальная часть его подвергнута сопутствующей термической обработке (нормализации) от нагрева заполняющим слоем. Кроме этого, в наплавленном металле корневого слоя могут быть поры и другие дефекты, а структура этого слоя из-за быстрого и неравномерного охлаждения может иметь недостатки. Формирование заполняющих слоев должно быть таким, чтобы переход от поверхности шва к поверхности кромок был плавным без подрезов, так как даже в неглубоких подрезах застревает шлак, который трудно удаляется механическим путем. Плавное формирование заполняющих слоев шва достигается выбором соответствующего сварного режима и применением качественных материалов — флюса и проволоки. Флюс должен быть хорошо просушен (температура не ниже 250—300 °С в течение 1—1,5 ч), а поверхности свариваемых кромок и электродной проволоки тщательно очищены от ржавчины и загрязнений. Для снижения трудоемкости по зачистке проволоки в трассовых условиях, а также для повышения качества сварных соединений промышленность выпускает омедненную сварочную проволоку. Медное покрытие обеспечивает стабильный подвод тока к сварочной проволоке, что значительно повышает устойчивость сварочного процесса. Непровары, возникающие на поверхности облицовочного слоя, исправляют, накладывая дополнительные валики автоматической сваркой под флюсом или ручной сваркой электродами соответствующей марки.

Для автоматической сварки труб из низколегированных сталей ( $\sigma_b < 550$  МПа) в средней и южной климатических зонах наиболее подходит применение флюса АН-348А в сочетании с малоуглеродистыми марганцовистыми проволоками (Св-08ГА и Св-10ГА), что обеспечивает требуемую ударную вязкость металла шва  $a_k = 0,4 \div 0,5$  МДж/м<sup>2</sup> при температуре —40 °С.

Сварку под флюсом АН-22 применяют в сочетании с марганцовистыми проволоками Св-08ГА, Св-10ГА для северной климатической зоны, особенно для надземной прокладки трубопроводов, для обеспечения гарантированных значений ударной вязкости металла шва в области отрицательных температур.

При автоматической сварке стыков трубопроводов из низколегированных сталей повышенной прочности ( $\sigma_b \geq 550$  МПа) целесообразно применять флюс АН-22 в сочетании с малоуглеродистыми и низколегированными молибденсодержащими сварочными проволоками Св-08ХМ и Св-08МХ, что обеспечивает весьма высокую прочность металла шва  $\sigma_b > 700$  МПа и гарантирует ударную вязкость  $a_k = 0,4 \div 0,6$  МДж/м<sup>2</sup> при температуре  $-60^\circ\text{C}$ . Оптимальные прочностные свойства сварных соединений обеспечиваются при  $q_{\text{ш}} = 36 \div 40$  кДж/см.

Сварку под флюсом АН-47 в сочетании с проволоками Св-08ГА, Св-08ХМ, Св-08МХ применяют во всех климатических зонах для сталей с пределом прочности  $\sigma_b > 550$  МПа. Применение флюса АН-47 с проволокой Св-08ХМ обеспечивает высокие механические свойства наплавленного металла ( $\sigma_b = 725$  МПа,  $a_k = 0,6 \div 0,8$  МДж/м<sup>2</sup> при температуре  $-60^\circ\text{C}$ .)

Сварка под флюсом АН-60 отличается той особенностью, что позволяет вести процесс на повышенных скоростях с одновременным увеличением погонной энергии. Этот флюс используют для сварки трубопроводов из малоуглеродистых и низколегированных сталей ( $\sigma_b < 550$  МПа), которые прокладывают под землей в средних и южных климатических зонах. Флюс АН-60 можно применять в сочетании с проволоками марок Св-08, Св-08А, Св-08АА и Св-08ГА.

При сварке проволокой диаметром 3 мм на форсированных режимах производительность сварочного процесса повышается на 15 %. Использование флюса АН-60 с проволокой Св-08ГА позволяет обеспечить предел прочности наплавленного металла  $\sigma_b = 540 \div 570$  МПа и ударную вязкость  $a_k = 0,6$  МДж/м<sup>2</sup> при температуре  $-20^\circ\text{C}$ .

Сварку под керамическим флюсом КВС-19 применяют для монтажа трубопроводов, изготовленных из малоуглеродистых и низколегированных сталей ( $\sigma_b = 550$  МПа), которые укладывают под землей в средних и южных климатических зонах. Флюс КВС-19 используют в сочетании с проволоками Св-08А, Св-08АА и Св-08ГА. Сварные соединения, выполненные проволокой Св-08ГА, имеют  $\sigma_b = 480 \div 500$  МПа,  $a_k = 0,55 \div 0,75$  МДж/м<sup>2</sup> при температуре  $-40^\circ\text{C}$ .

Сварка под керамическим флюсом ВСКФ-60 малоуглеродистыми проволоками Св-08А, Св-08АА позволяет обеспечить предел прочности шва  $\sigma_b = 660$  МПа и  $a_k = 0,72 \div 0,85$  при температуре  $-60^\circ\text{C}$  благодаря обеспечению в металле шва легирующих добавок (примерно 0,4 % молибдена, 1,2—1,4 % марганца и 0,25—0,4 % кремния). Флюс ВСКФ-60 применяют для сварки труб из низколегированных сталей с пределом прочности  $\sigma_b \geq 550$  МПа в северных районах.

Односторонняя многопроходная сварка с автоматической и полуавтоматической подваркой корня шва в среде углекислого газа производится на сварочной базе в различных климатиче-

ских зонах. Корневой слой шва поворотных и неповоротных стыков трубопроводов ( $\sigma_b \geq 550$  МПа) выполняют на специальном промежуточном сварочном стенде. Сварку ведут проволокой Св-08Г2С, обеспечивая предел прочности наплавленного металла  $\sigma_b = 738$  МПа,  $a_k = 0,63$  МДж/м<sup>2</sup> при температуре —60 °С.

Первый слой шва, во избежание получения прожогов при автоматической сварке под флюсом, должен иметь толщину не менее 4 мм. Последующие заполняющие слои шва выполняют также автоматической сваркой под флюсом.

### Двусторонняя сварка трубопроводов

Двусторонняя автоматическая сварка под слоем флюса, применяемая в трассовых условиях, позволяет при изготовлении трубных секций на базе полностью исключить ручной труд, что повышает производительность в 1,5—2 раза за счет уменьшения объема наплавленного металла, полной механизации процесса и форсирования сварочных режимов.

Сварку поворотных стыков выполняют на специализированных трубосварочных базах типа БТС-71, БТС-142 и БТС-143 с применением труб диаметром 720—1420 мм. Перед сборкой трубы обрабатывают лобовыми станками СПК (рис. 90). Это мероприятие позволяет сократить количество наплавленного металла и использовать для процесса сварки достаточно высокую плотность тока. Затем выполняют сборку труб в секцию при помощи внутреннего центризатора, прихватку автоматической сваркой под флюсом и сварку первого и последующих слоев шва снаружи, после чего сваривают стык внутри трубной секции также автоматической сваркой.

При сварке труб с пределом прочности более 550 МПа используют флюс АН-348А с проволокой Св-08ГА, что связано с увеличением в 5 раз доли участия основного металла в формировании сварного соединения при двусторонней сварке.

Требуемый тепловой режим при сварке труб из высокопрочных сталей толщиной 17—20 мм: скорость охлаждения при

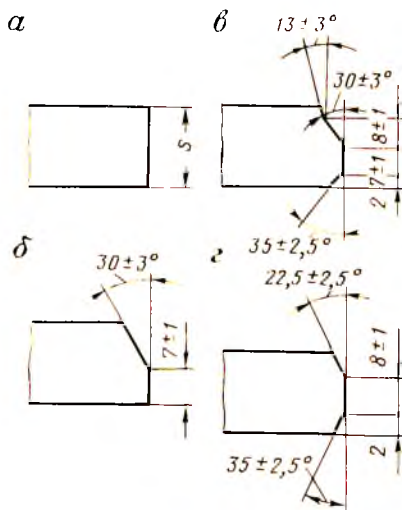


Рис. 90. ВИД РАЗДЕЛОК КРОМК (а, б, в, г) ДЛЯ ДВУСТОРОННЕЙ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКИ

## РЕЖИМЫ ДВУСТОРОННЕЙ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКИ ТРУБ

| Диаметр<br>труб, мм | Толщина<br>стенки, мм | Вид<br>разделки<br>(см. рис. 90) | Номер слоя  | Ток дуги,<br>А | Напряжение<br>на дуге,<br>В | Скорость<br>сварки,<br>м/ч | Угол<br>наклона<br>электрода<br>«вперед»,<br>градус | Смещение<br>электрода<br>с зенита<br>(надира),<br>мм |
|---------------------|-----------------------|----------------------------------|-------------|----------------|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------------------------------|------------------------------------------------------|
| Наружная сварка     |                       |                                  |             |                |                             |                            |                                                     |                                                      |
| 720—820             | 7,5—11                | <i>a</i>                         | I           | 550—700        | 42—46                       | 35—45                      | До 30                                               | 30—50                                                |
| 720—820             | 11,5—18               | <i>б</i>                         | I           | 550—650        | 42—46                       | 30—40                      | До 30                                               | 30—50                                                |
|                     |                       | —                                | Последующие | 600—700        | 44—48                       | 35—45                      | До 30                                               | 20—40                                                |
| 720—820             | 19 и более            | <i>в</i>                         | I           | 500—600        | 42—46                       | 35—45                      | До 30                                               | 30—50                                                |
|                     |                       |                                  | Последующие | 600—700        | 44—48                       | 30—45                      | До 30                                               | 20—40                                                |
| 1020—1220           | 9—11                  | <i>a</i>                         | I           | 600—700        | 45—48                       | 35—45                      | До 10                                               | 50—70                                                |
| 1020—1220           | 11,5—21,5             | <i>г</i>                         | I           | 700—800        | 44—46                       | 40—50                      | До 10                                               | 50—70                                                |
|                     | 22—26                 | —                                | Последующие | 700—800        | 45—48                       | 35—45                      | До 10                                               | 40—60                                                |
| 1420                | 16,5—17,5             | <i>г</i>                         | I           | 900—950        | 44—46                       | 50—55                      | До 15                                               | 60—80                                                |
|                     |                       | —                                | II          | 750—800        | 46—48                       | 45—50                      | До 15                                               | 60—80                                                |
| 1420                | 19,5—20,5             | <i>г</i>                         | I           | 950—1000       | 45—47                       | 48—50                      | До 30                                               | 40—60                                                |
|                     |                       | —                                | II          | 750—800        | 46—48                       | 40—45                      | До 30                                               | 70—90                                                |
| Внутренняя сварка   |                       |                                  |             |                |                             |                            |                                                     |                                                      |
| 720—1220            | 7,5 и более           |                                  | I           | 600—700        | 42—46                       | 35—45                      | 10                                                  | 15—25                                                |
| 1220—1420           | 16 и более            | —                                | I           | 750—800        | 42—46                       | 40—50                      | 20                                                  | 15—25                                                |

Примечания. 1. Применяют постоянный ток обратной полярности; диаметр электрода 3 мм; вылет электрода 40—50 мм. 2. При сварке толстостенных труб разрешается применять ток прямой полярности.



температуре 300 °С не должна превышать 4—6 °С/с, а время пребывания шва при охлаждении в интервале температур 500—800 °С должно быть менее 35 с, что соответствует скорости охлаждения 8,5 °С/с и менее. Погонную энергию процесса  $q_n$  устанавливают не выше 36 кДж/см. Режимы сварки для двусторонней автоматической сварки труб (табл. 16) обеспечивают полный провар стыка с перекрытием внутреннего и наружного слоев шва не менее чем на 3 мм, что гарантирует отсутствие непровара даже при колебаниях тока и отклонениях электрода от центра стыка в пределах  $\pm 1$  мм. Сварка внутреннего слоя шва позволяет обеспечить коэффициенты формы шва более 2 при глубине проплавления не более 9 мм.

### Сварка листовых конструкций под флюсом

Однопроходную сварку стыковых швов под флюсом на остающейся стальной подкладке применяют для соединения тонких листов (окрайков, резервуаров до 10 мм). Подкладку плот-



Рис. 91. СВАРКА НА СТАЛЬНОЙ ОСТАЮЩЕЙСЯ ПОДКЛАДКЕ

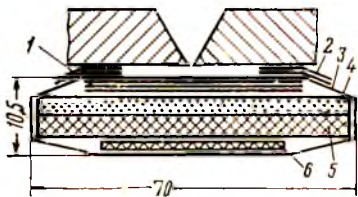


Рис. 92. СВАРКА НА ВРЕМЕННОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ПОДКЛАДКЕ:

1 — стеклоткань; 2 — клейкая лента; 3 — термостойкая пленка; 4 — формирующий материал; 5 — огнеупор; 6 — картон

но прижимают к свариваемым кромкам на монтаже и приваривают к одному листу (рис. 91). При сварке стыка подкладка в значительной мере проплавляется и приваривается к нижней части кромок. В зависимости от толщины листов зазор между подкладкой и кромками не должен превышать 0,5—1 мм, в противном случае металл протечет в зазор и высота усиления шва будет недостаточной. Стальная подкладка применяется в тех случаях, когда по условиям работы конструкции наличие остающейся подкладки допустимо.

Однопроходную сварку на временной технологической подкладке (рис. 92) применяют в монтажных условиях Японии. Подкладки длиной 300, 600, 900 мм прижимают к свариваемым кромкам с помощью пружин, струбцин и т. п. В этих подкладках используют гибкую полосу из слоев формирующего материала — огнеупора, асбеста и гофрированного картона. Для формирования обратного валика шва применяется состав, который имеет 30 % железного порошка, 25 % рутила, 10 %

флюорита, 10 % циркона, 10 % магнезита, 10 % ферросилиция и 5 % кремнезема.

Сварку двусторонних швов применяют для изготовления листовых конструкций (полотнищ резервуаров) при рулонировании. Сварку первого слоя обычно выполняют на флюсовой подушке (рис. 93) или на медной подкладке (рис. 94). Флюсовой подушкой называют слой флюса, который находится под кромками стыка и поджигается к ним снизу, препятствуя протеканию жидкого металла. Флюсовая подушка помещается в желоб сборочного станда. Этот способ сварки требует мень-

Рис. 93. СВАРКА НА ФЛЮСОВОЙ ПОДУШКЕ

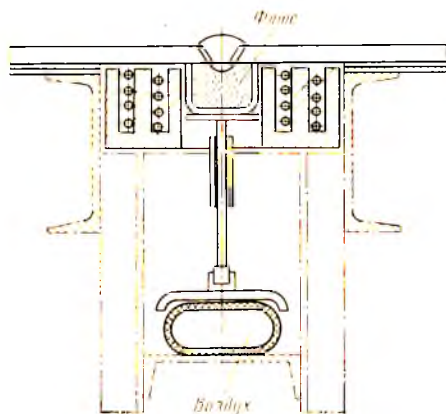
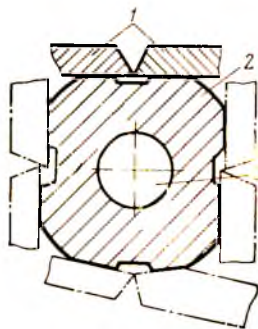


Рис. 94. СВАРКА НА МЕДНОЙ ПОДКЛАДКЕ:

1 — свариваемые листы; 2 — медный поворотный брус; 3 — полость для охлаждающей воды



шей точности сборки и применим для толщин 5—14 мм. При сварке первого слоя шва на флюсовой подушке не предъявляется особых требований к равномерности прижатия флюса к стыку. При сварке первого слоя шва на медной подкладке стыки поджимают к ней с помощью гидравлической системы. Подкладка, обладая большой теплопроводностью, не приваривается к кромкам и обеспечивает правильное формирование шва с обратной стороны. В этом случае смещение стыкуемых кромок не допускается. Медную подкладку можно охлаждать водой. Ее изготавливают в виде поворотного бруска, каждая из четырех сторон которого имеет формирующую канавку. Часто формирующий желобок увеличенных размеров засыпают флюсом и тогда сварку проводят на «флюсомедной подкладке». Приведенные виды подкладок применяют также для сварки односторонних швов. Режимы двусторонней сварки выбирают таким образом, чтобы оба слоя сваривались без переналадки сварочной аппаратуры.

## АВТОМАТИЧЕСКАЯ СВАРКА С ПРИНУДИТЕЛЬНЫМ ФОРМИРОВАНИЕМ ШВА

Сварка с принудительным формированием шва позволяет механизировать соединения неповоротных стыков, находящихся в разных пространственных положениях с помощью искусственного интенсивного охлаждения поверхности расплавленного металла и шлака. Принудительное формирование шва проводится с применением формирующих устройств, охлаждаемых водой или без охлаждения. В результате интенсивного теплоотвода на границе раздела металл — шлак обеспечивается необходимое поверхностное натяжение, которое оказывается достаточным для удержания сварочной ванны в требуемом пространственном положении.

Вертикальные стыки цилиндрических резервуаров можно сваривать с применением флюса, который периодически засыпают в зону плавления или с применением порошковой проволоки. Листы с толщиной стенки 8—26 мм собирают с зазором 10—12 мм. Кромки свариваемых листов не имеют скоса, и электрод 1 подают в зазор таким образом, чтобы его ось совпадала с осью шва (рис. 95). Формирование шва 4 осуществляется перемещающимися ползунами 2 и 5, один из которых 5 проходит между П-образными скобами 6. Качество вертикальных швов в значительной мере зависит от регулирования высоты сварочной ванны 3 между ползунами. Уровень сварочной ванны будет неизменным, если соблюдается условие

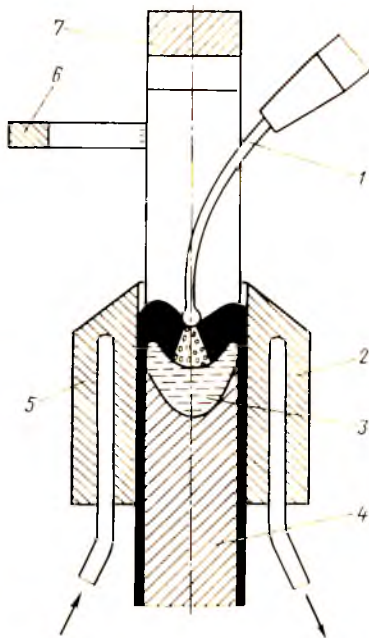


Рис. 95. СВАРКА СТенок ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ С ПРИНУДИТЕЛЬНЫМ ФОРМИРОВАНИЕМ ШВА

$$F_{\text{ш}} v_{\text{св}} = F_{\text{з}} v_{\text{п}}, \quad (26)$$

где  $F_{\text{ш}}$  — площадь поперечного сечения шва;  $v_{\text{св}}$  — скорость сварки;  $F_{\text{з}}$  — площадь поперечного сечения проволоки;  $v_{\text{п}}$  — скорость подачи проволоки.

Из уравнения (26) следует, что уровень ванны можно регулировать изменением скорости подачи проволоки или скорости сварки.

Процесс сварки вертикальных швов начинается с зажигания дуги и образования сварочной ванны. Ползуны устанавливают таким образом, чтобы уровень металлической ванны был несколько ниже заданного. Перемещение ползунков начинается после того, как уровень ванны достигнет требуемого положения, на которое настроена схема сварочной ванны. Заключается сварка на вывodom медном сухаре 7, что предотвращает получение усадочной раковины в конце шва.

На сварочный процесс с принудительным формированием шва основное влияние оказывают следующие элементы режима: сварочный ток, напряжение дуги, скорость подачи проволоки, скорость сварки и глубина шлаковой ванны. Скорость сварки и тепловой режим процесса зависят от сварочного тока и ширины зазора. Увеличение тока приводит к уменьшению ширины провара, что связано с погружением дуги в глубь ванны. Напряжение дуги, как и при сварке со свободным формированием шва, оказывает влияние на ширину шва. С возрастанием напряжения ширина шва увеличивается, но в меньшей степени, чем при свободном формировании.

Для сварки с принудительным формированием шва используют флюсы АН-348А, ОСЦ-45, АНКФ-28 и проволоки Св-08, Св-08ГА, Св-10Г2 и др. Сварка производится с использованием генераторов постоянного тока, имеющих пологопадающую внешнюю характеристику.

Сварку с принудительным формированием шва можно также выполнять порошковой проволокой. В этом случае расплавленный электродный металл и сварочная ванна защищены от влияния атмосферы шлаком и газом, выделяющимся при расплавлении шлакообразующих и разложении газообразующих составляющих сердечника порошковой проволоки. Шлакообразующие компоненты вводят в проволоку для образования слоя шлака между швом и ползуном, а также для защиты металлической ванны. Глубина шлаковой ванны поддерживается определенной величины с помощью автоматической системы сварочного аппарата. Вертикальные соединения с принудительным формированием шва можно сваривать порошковой проволокой с дополнительной защитой углекислым газом. В этом случае отпадает необходимость вводить газообразующие металлы в сердечник проволоки.

Для сварки с принудительным формированием шва применяют порошковую проволоку карбонатно-флюоритного типа ПП-АНЗС или ПП-АН7. Дуговую сварку металла толщиной 10—20 мм выполняют проволокой ПП-АНЗС диаметром 3 мм на следующем режиме:  $I=400\div450$  А,  $U=24\div27$  В,  $v_{св}=4\div7$  м/ч при зазоре между кромками 10—12 мм. При сварке проволокой ПП-АН7 диаметром 3 мм с дополнительной защитой ванны углекислым газом процесс ведется на режиме  $I=400\div500$  А,  $U=23\div25$  В, расход углекислого газа 10—

25 л/мин. Сварочные работы порошковой проволокой с принудительным формированием шва выполняют с использованием источников питания дуги, имеющих жесткую или пологопадающую внешнюю характеристику.

Для выполнения неповоротных стыков магистральных трубопроводов диаметром 320—1420 мм также применяют сварку с принудительным формированием шва для сталей класса К52, К56, К60.

Нормальное формирование шва в различных пространственных положениях обеспечивают, добиваясь равновесия сил, действующих на сварочную ванну, в частности давления дуги, силы поверхностного натяжения и массы металла жидкой ванны.

Для автоматической сварки трубопроводов диаметром 1020—1420 мм Институтом электросварки им. Е. О. Патона (ИЭС) разработан и применяется в трассовых условиях комплекс оборудования ОПС-141. Сварка неповоротных стыков трубопроводов с принудительным формированием шва производится следующим образом (рис. 96). Отдельные трубы или секции 1 со стандартной или специальной разделкой кромок собирают при помощи внутреннего центратора, который имеет медную подкладку 8. Далее в верхней части стыка делают захватку ручной сваркой, в месте отсутствия медных подкладок. Затем по обе стороны стыка устанавливают автоматы, соединяя клещевой захват с помощью гидравлической системы. Сварочный автомат, состоящий из тележки 3, подающего механизма 4, кассеты с проволокой 5, устанавливают в нижней части стыка (надире) и перемещают по направляющей 2 к стыку. В зазор, образованный кромками свариваемых труб, медной подкладкой, перемещающимся ползуном 7, подается порошковая проволока 6. Сварку второй половины стыка выполняют другим автоматом с некоторым отставанием от первого, чтобы завершить сплавление полуокружностей одним автоматом. Стыки труб с толщиной стенки 16,5—17,5 мм сваривают автоматической сваркой с принудительным формированием в два прохода, так как в потолочном положении невозможно удержать расплавленный металл высотой более 10 мм. Для первого слоя шва используют ползуны, имеющие на формирующей поверхности выступ высотой 8 мм. Облицовочный слой шва форми-

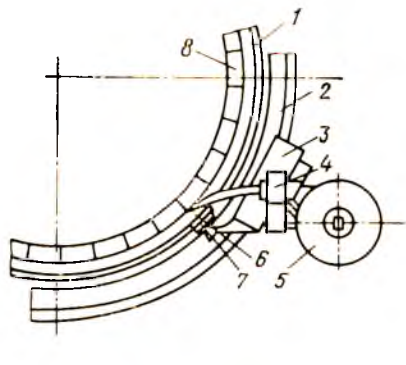


Рис. 96. СВАРКА НЕПОВОРОТНЫХ СТЫКОВ ТРУБОПРОВОДОВ С ПРИНУДИТЕЛЬНОМ ФОРМИРОВАНИЕМ ШВА

руют при помощи внутреннего центратора, который имеет медную подкладку 8. Далее в верхней части стыка делают захватку ручной сваркой, в месте отсутствия медных подкладок. Затем по обе стороны стыка устанавливают автоматы, соединяя клещевой захват с помощью гидравлической системы. Сварочный автомат, состоящий из тележки 3, подающего механизма 4, кассеты с проволокой 5, устанавливают в нижней части стыка (надире) и перемещают по направляющей 2 к стыку. В зазор, образованный кромками свариваемых труб, медной подкладкой, перемещающимся ползуном 7, подается порошковая проволока 6. Сварку второй половины стыка выполняют другим автоматом с некоторым отставанием от первого, чтобы завершить сплавление полуокружностей одним автоматом. Стыки труб с толщиной стенки 16,5—17,5 мм сваривают автоматической сваркой с принудительным формированием в два прохода, так как в потолочном положении невозможно удержать расплавленный металл высотой более 10 мм. Для первого слоя шва используют ползуны, имеющие на формирующей поверхности выступ высотой 8 мм. Облицовочный слой шва форми-



руют с помощью ползунов, обеспечивающих высоту усиления 2—3 мм. Производительность процесса в этом случае можно определить из формулы  $G = G_n/t$ , где  $G$  — масса наплавленного металла в единицу времени;  $G_n$  — масса наплавленного металла,  $G_n = \alpha_n It$ ,  $\alpha_n$  — коэффициент наплавки порошковой проволоки;  $t$  — время расплавления проволоки.

Для сварочного процесса используют порошковую проволоку ПП-АН19 и ПП-АН24. Сварку проволокой ПП-АН19 осуществляют на токе 280—300 А, напряжении 26—27 В, скорости сварки 14—15 м/ч. Применение проволоки ПП-АН24 позволяет выполнять работы на повышенных режимах при сварочном токе 350—400 А, напряжении 28—32 В.

Процесс автоматической сварки с принудительным формированием шва в трассовых условиях сочетают с ручной электродуговой сваркой, когда для выполнения первого слоя шва применяют серийные центраторы любого типа. В этом случае сварку корневого слоя шва выполняют вручную одновременно два сварщика электродами с целлюлозным покрытием диаметром 4 мм. Расстояние от низа трубы до поверхности земли устанавливают не менее 0,5 м для обеспечения прохода автоматической сварочной головки. После сварки корневой слой зачищают шлифовальной машинкой с удалением наплывов и металла, закрывающего зашлакованные карманы. Второй слой шва «горячий проход» выполняют также два сварщика электродами с целлюлозным покрытием диаметром 4 мм. После окончания процесса сварки шов тщательно зачищают. Последний проход выполняют одновременно две автоматические сварочные головки комплекса ОПС-141. Каждая головка сваривает половину стыка, перемещаясь вместе с формирующим ползуном снизу вверх. Для увеличения темпа продвижения сварочной колонны предусматривают увеличение числа сварщиков на каждом слое до четырех и применение двух-трех установок ОПС-141.

### ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ СВАРКИ ПОД ФЛЮСОМ

При сооружении магистральных трубопроводов и листовых конструкций часто применяют переносные сварочные установки для механизированной сварки под флюсом. Сварку стыков магистральных трубопроводов выполняют обычно специализированными сварочными головками, а для сварки листовых конструкций применяют стационарные установки и передвижные универсальные (например, сварочные тракторы). Установка для механизированной сварки состоит из источника питания сварочной дуги, шкафа управления, в котором расположены источники питания электродвигателей автомата, устройства для замыкания и размыкания сварочной и вспомогательных цепей; устройства (сварочная головка) для зажигания дуги; подачи проволоки в зону сварки; устройства (каретка) для перемеще-



ния сварочной головки вдоль стыка с кассетой со сварочной проволокой, пультом управления и бункером для флюса. При поворотной сварке стыков трубопроводов устройство для перемещения сварочной головки отсутствует и эту роль выполняет вращатель, который синхронно работает с подающим механизмом.

### Сварочные головки

Сварочные головки переносного типа СГФ и полустационарные ГДФ (табл. 17) используют для выполнения поворотных стыков под слоем флюса в полевых условиях. Сварочная головка ГДФ-1001-УЗ (рис. 97) используется в полевых автосварочных установках ПАУ-1001 и ПАУ-1001В для сварки труб диаметром 529—1420 мм. Головка ГДФ 1001-УЗ относится к автоматам подвесного типа, которая на подвеске укрепляется на колонне. Головка имеет механизированный привод опускания на стык и подъем. На поверхность трубы головка опирается роликами, которые копируют трубу в процессе сварки. Головка оснащена специальным аппаратом, позволяющим после сварки удалять флюс со стыка в бункер. Все регулировочные перемещения фиксируют указателями. Головка комплектуется выпрямителем ВДУ-1001-УЗ.

Таблица 17

ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СВАРОЧНЫХ ГОЛОВОК

| Тип         | Размеры, мм |        |        | Масса (без проволоки и флюса), кг | Сварочный ток, А | Диаметр электродной проволоки, мм | Скорость подачи проволоки, м/мм | Емкость кассеты с проволокой, кг |
|-------------|-------------|--------|--------|-----------------------------------|------------------|-----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|
|             | Длина       | Ширина | Высота |                                   |                  |                                   |                                 |                                  |
| СГФ-601     | 800         | 380    | 520    | 37                                | До 600           | 2                                 | 192—572                         | 10                               |
| СГФ-1004    | 825         | 400    | 715    | 40                                | До 1000          | 2,3                               | 186—565                         | 12                               |
| ГДФ-1001-УЗ | 1680        | 1050   | 1845   | 300                               | До 1000          | 3,5                               | 28—1060                         | 35                               |

Головку СГФ-1004 (рис. 98) используют в полевых автосварочных установках ПАУ-601 и ПАУ-602 для автоматической сварки трубопроводов под слоем флюса. Эта усовершенствованная головка позволяет вести сварку поворотных стыков труб диаметром 325—1420 мм по предварительно подваренному первому слою шва. Сварочная головка СГФ-1004 смонтирована на четырехколесной тележке и имеет электродвигатель с редуктором, подающий механизм, токоподвод, бункер с флюсом, крошштейн с кассетой и пульт управления. Головка имеет корректор, который позволяет сместить электрод относительно зе-

нита труб на 20—120 мм. Для надежного подвода тока к электродной проволоке головка комплектуется токоподводами двух типов: пружинным и трубчатым. Пружинный токоподвод используют для сварки труб диаметром 720—1420 мм проволокой диаметром 2—3 мм. Токоподвод имеет мундштук, на нижнем конце которого крепится токосъемник, состоящий из двух брон-

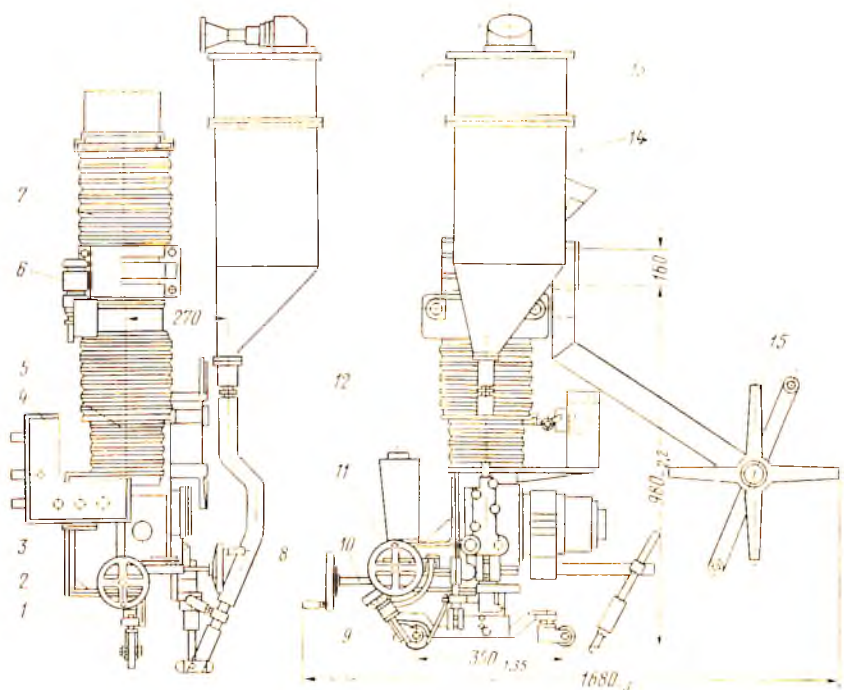


Рис. 97. СВАРОЧНАЯ ГОЛОВКА ГДФ-1001-УЗ:

1 — опорные ролики; 2 — подвеска; 3 — механизм подачи; 4 — пульт; 5 — механизм скольжения; 6 — механизм подъема; 7 — штанга; 8 — горелка; 9 — светоуказатель; 10 — суппорт продольный; 11 — суппорт поперечный; 12 — механизм правильно-прижимной; 13 — флюсоаппарат; 14 — флюсобункер; 15 — катушка и тормозное устройство

зовых накладок, одна из которых с помощью пружины давит на проволоку, обеспечивая надежный контакт. Трубчатый токоподвод применяют для сварки трубопроводов диаметром 720—1420 мм. В этом случае мундштук имеет наконечник, который рассчитан на электродную проволоку диаметром 3 мм. Если устанавливают наконечник для проволоки диаметром 2 мм, то такой токоподвод используют при сварке труб диаметром 325—720 мм.

Для подачи флюса в зону сварки головку комплектуют флюсоподводами двух типов: раздельным и охватывающим. Раздельный флюсоподвод применяют при сварке труб диаметром

720—1420 мм, а охватывающий — для труб диаметром 325 — 720 мм. Каждый флюсоподвод жестко закреплен с токоподводом и корректором копирует их совместное перемещение при работе.

Головку СГФ-601 используют на полевых автосварочных установках ПАУ-601 и ПАУ-602 для сварки труб диаметром до 1220 мм. Расположение узлов и конструкция сварочной головки СГФ-601 соответствуют СГФ-1004, отличие — в регули-

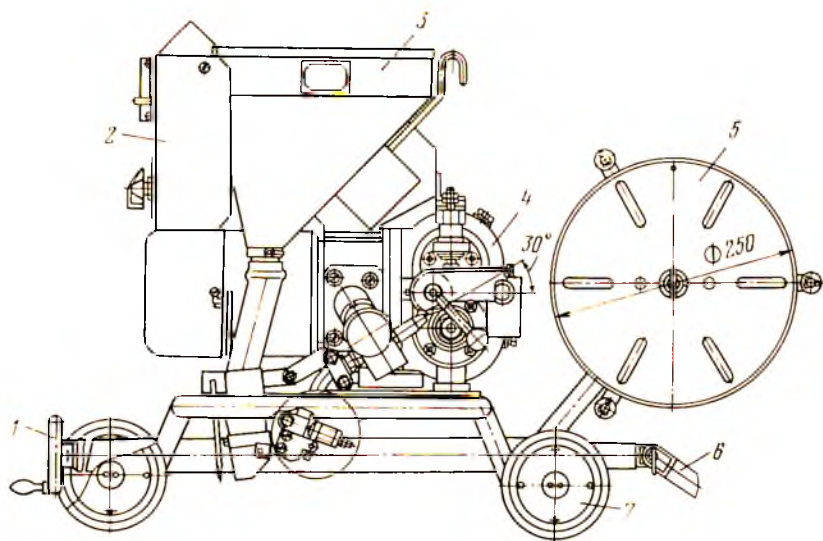


Рис. 98. СВАРОЧНАЯ ГОЛОВКА СГФ-1004:

1 — корректор; 2 — пульт управления; 3 — бункер; 4 — подающий механизм; 5 — кас-сета; 6 — штатив; 7 — опорные ролики

ровании напряжения на дуге, их мощности по току и габаритам. Сварочные головки типа СГФ, ГДФ и ПАУ разработаны Киевским филиалом СКБ «Газстроймашина».

### Сварочные комплексы, автоматы и полуавтоматы

Сварочный комплекс ОПС-141 используют для неповоротной сварки стыков труб диаметром 1220—1420 мм с принудительным формированием шва. Каждый комплекс состоит из внутреннего гидравлического центратора с медным подкладным кольцом, сварочного аппарата и самоходного сварочного агрегата, смонтированного на базе трактора ТТ-4. Медное подкладное кольцо формирует обратный валик корня шва и имеет два ряда формирующих устройств, что обеспечивает их плотное прилегание к внутренней поверхности труб при смещении кро-

мок. Сварочный аппарат состоит из двух тракторов (правого и левого), жесткого рельсового пути, шкафа, пульта управления и сварочной кабины. Сварочный трактор имеет самоходную тележку, на которой размещены сварочная головка, охлаждаемый водой формирующий ползун, корректор смещения электрода и ползуна, кассету с проволокой. Рельсовый путь служит для перемещения сварочных тракторов вокруг стыка и имеет два С-образных сектора, соединенных шарниром и замыкаемых с помощью гидравлической системы. Сварочный агрегат служит

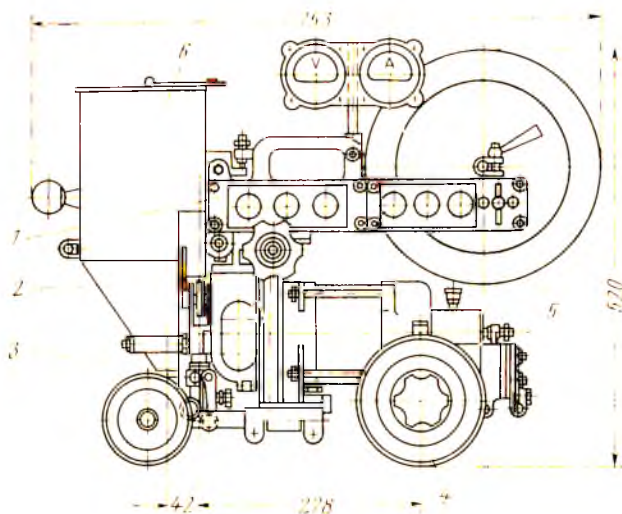


Рис. 99. СВАРОЧНЫЙ ТРАКТОР ТС-17МУ:

1 — пульт управления; 2 — механизм подачи электродной проволоки; 3 — токоподводящий мундштук; 4 — ходовой механизм; 5 — кассета; 6 — бункер

для питания током сварочного процесса и перемещения сварочных тракторов. В кузове самоходного агрегата расположены электростанция мощностью 100 кВт, два сварочных выпрямителя с рабочим током до 500 А и один — до 300 А, предназначенный для ручной сварки, автономный пост охлаждения формирующих ползунков и аппаратура управления. Комплекс имеет передвижную мастерскую для хранения и подготовки к работе сварочных материалов, для производства текущих ремонтов и профилактического обслуживания сварочного оборудования. Мастерская размещается в кузове «КУНГ» на салазках.

Автоматы переносного типа — универсальные сварочные тракторы — применяют в строительстве вместе со шкафом управления и источником питания сварочной дуги. Автомат ТС-17МУ (рис. 99) универсальный, его применяют для сварки стыковых, угловых и нахлесточных соединений. Трактор

ТС-17МУ имеет один электродвигатель, который приводит в движение механизм подачи электрода и ходовой механизм. Скорость подачи электродной проволоки и скорость сварки настраивают сменными шестернями. Автомат ТС-17МУ можно настраивать на сварку швов различных типов с помощью сменных узлов и деталей. При поворотной сварке трубопроводов диаметром 1420 мм автомат устанавливают внутри секции и подваривают корневой шов. Стыковые и нахлесточные соединения при сварке листовых конструкций выполняют также автоматом ТС-17МУ.

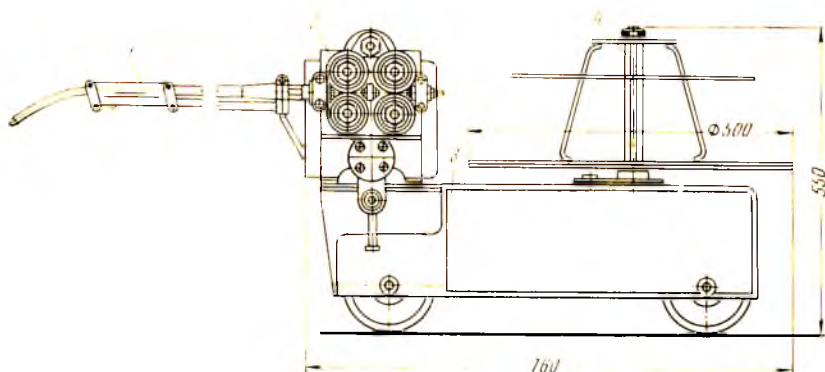


Рис. 100. ШЛАГОВЫЙ ПОЛУАВТОМАТ А-765:

1 — ручной держатель; 2 — механизм подачи проволоки; 3 — шкаф управления; 4 — катушка для проволоки

Автоматы ТС-17Р, ТС-35 по конструкции напоминают ТС-17МУ и могут сваривать стыковые, угловые, нахлесточные и тавровые соединения.

Автомат АДФ-1001 малогабаритный, универсального типа, используют для подварки корня шва электродной проволокой диаметром 2—5 мм на постоянном токе.

Автомат А-820М одноэлектродный, перемещающийся по уголку, который приваривается к свариваемой поверхности. Сварочный автомат состоит из головки, подающего механизма, двух водоохлаждаемых ползунов, шкафа управления и кассет для сварочной проволоки. На каретке автомата смонтированы сварочная головка с редуктором, токопроводящий мундштук с корректорами, бункер для флюса и пульт управления. Автомат можно использовать для электрошлаковой сварки вертикальных швов при толщине металла 18—50 мм, а также для сварки с принудительным формированием. При строительстве цилиндрических резервуаров большой вместимости автомат выполняет вертикальные стыки с принудительным формированием. Для формирования шва имеются два медных ползуна,

которые перемещаются с головкой по мере поднятия сварочной ванны. Принудительное формирование шва часто выполняют с применением порошковой проволоки. Сварочная проволока диаметром 2,5—3 мм подается в зону плавления отдельно стоящим подающим механизмом через специальный шланг. Скорость сварки 4—15 м/ч.

Полуавтомат ПШ-54 состоит из переносного механизма подачи электродной проволоки, шланга с держателем ДШ-54 и шкафа управления. Проволока подается механизмом подачи, который приводится в движение асинхронным электродвигателем. Сварку резервуаров ведут на постоянном токе.

Полуавтомат А-765 (рис. 100) применяют для сварки порошковой и легированной сплошной проволоками резервуаров и арматуры железобетонных конструкций. При сварке резервуаров и арматуры механизм подачи отделяют от шкафа управления, снабжают небольшой кассетой для электродной проволоки и относят от шкафа управления на расстояние до 15 м. Механизм подачи электродной проволоки приводится в движение электродвигателем переменного тока АОЛ-12-2. Скорость подачи сварочной проволоки изменяют набором сменных шестерен. Подающие ролики электрически изолированы от корпуса механизма.

---

## *Глава 11*

### **ПОЛЕВЫЕ ТРУБОСВАРОЧНЫЕ БАЗЫ**

Полевые трубосварочные базы применяют для механизированной сборки и сварки отдельных труб в секции длиной 24—36 м и более. Существующая технология строительства магистральных трубопроводов предусматривает применение баз двух типов: полустационарных и передвижных. Применение трубосварочных баз позволяет механизировать сборочные операции, применять высокопроизводительные методы сварки, организовать поточный контроль качества сварочных работ. На механизированных базах стыки соединяют в поворотном положении с применением автоматической сварки под слоем флюса и в неповоротном — с использованием электроконтактной сварки. При сооружении магистральных трубопроводов применение баз каждого типа и их расстановка по трассе определяются технико-экономическими расчетами с учетом длины труб, условий местности, степени механизации и автоматизации баз, производительности труда и т. д.



## РАСПОЛОЖЕНИЕ ПОЛУСТАЦИОНАРНЫХ СВАРОЧНЫХ БАЗ НА ТРАССЕ

При строительстве линейной части магистральных трубопроводов трубосварочные базы организуют в полевых условиях на трассе. Место и радиус действия трубосварочных баз выбирают в зависимости от следующих обстоятельств: наличия транспортных магистралей для создания бесперебойной работы транспорта (железнодорожного, автомобильного, речного и т. д.) по доставке труб и вывозке сваренных секций в период строительства; рельефа местности, где размещается база, и климатических условий в период выполнения сборочно-сварочных работ по сезонам года; возможности работы сварочно-монтажной базы в центре обслуживаемого участка; возможности культурно-бытового обслуживания персонала (близость к населенным пунктам, культурно-бытовым учреждениям и т. д.).

Полустационарные сварочные базы размещают по возможности на возвышенных местах с радиусом действия 7—12 км. В зависимости от наличия дорог и речных сообщений указанные расстояния могут увеличиваться в северных условиях и уменьшаться в горной местности. Сварочно-монтажные базы размещают на ровных площадках размером от  $60 \times 100$  до  $150 \times 150$  м в зависимости от их конструктивных особенностей. Требуемое число сварочных баз определяют по формуле

$$C = \beta L_{\max} / (l P n k),$$

где  $\beta$  — коэффициент, характеризующий отношение числа стыковых труб, выполненных на трассе, к числу стыков, выполненных на базе,  $\beta \approx 0,65$ ;  $L_{\max}$  — протяженность участка трубопровода, прокладываемого в год максимальной загрузки;  $l$  — средняя длина труб (10—12 м);  $P$  — нормативная производительность сварочной базы;  $n$  — число стенов автоматической сварки на базе;  $k$  — коэффициент использования базы, учитывающий организационно-технические перерывы,  $k = 0,6$ .

Схема расположения сварочных баз  $B_1$ ,  $B_2$  и  $B_3$  или последовательность перемещения одной и той же базы по мере ведения работ изображена на рис. 101. Направление транспортировки секций по трассе показано стрелками. Сварочные базы расположены на расстоянии  $L = L_1 + L_2$ , где  $L_1$  — участок трассы, где транспортируют секции с базы  $B_1$  в направлении базы  $B_2$ ;  $L_2$  — участок трассы, где транспортируют секции с базы  $B_2$  в направлении базы  $B_1$ . Расстояние  $L$  определяют технико-экономическим расчетом. Оно может значительно изменяться в заболоченных районах Севера. Определение расстояния  $L$  между базами начинается с рассмотрения схемы транспортирования труб и других строительных материалов с пунктов выгрузки (железнодорожных станций, пристаней или портов) на трассу.

Аналитическим или графическим методом можно найти участки трассы трубопровода, которые обслуживают имеющиеся пункты выгрузки. Обозначим буквами  $A, B, C, D$  пункты выгрузки труб (рис. 102), которые находятся от трассы на расстояниях  $a, b, c$  и  $d$ . В этом случае трубосварочные базы будут находиться в точках  $A_1, B_1, C_1$  и  $D_1$ , стоящих на кратчайших расстояниях  $AA_1, BB_1, CC_1, DD_1$  (пункты выгрузки) от трассы трубопровода. Границы участков обслуживания для двух соседних пунктов можно найти из равенства  $l_1'' = (L_1 + b - a)/2$ . Эти границы определяют также графически как проекции точек  $E, F, G$ , проводимых через точки  $A, B, C, D$  под углом  $45^\circ$  к горизонтали. Основным критерием выбора рациональных границ

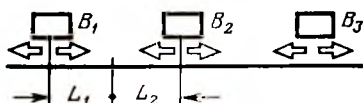
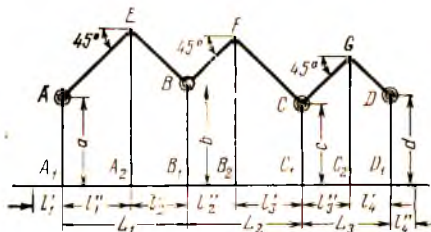


Рис. 101. СХЕМА РАЗМЕЩЕНИЯ ТРУБОСВАРОЧНЫХ БАЗ НА ТРАССЕ

Рис. 102. СХЕМА ВЫБОРА РАЦИОНАЛЬНЫХ РАССТОЯНИЙ ПРИ РАЗМЕЩЕНИИ ТРУБОСВАРОЧНЫХ БАЗ



обслуживания может служить средневзвешенная дальность возки  $L_{\text{ср}}$ , рассчитываемая по формуле

$$L_{\text{ср}} = \frac{M_1' + M_1'' + M_2' + \dots + M_n''}{L_1 + L_2 + L_3 + \dots + L_n} = \frac{\sum M}{\sum L},$$

где  $M_1'$  и  $M_1''$  — линейные моменты возки;

$$M_1' = (a + l_1'/2) l_1'; \quad M_1'' = (a + l_1''/2) l_1'' \quad \text{и т. д.};$$

$\sum M$  — сумма линейных моментов возки;  $\sum L$  — общая длина трассы трубопровода.

Средневзвешенную дальность возки для трубосварочных баз определяют отдельно при перевозке труб из пунктов выгрузки до базы и при транспортировке секций труб от базы на трассу. Пункт выгрузки труб может обслуживать несколько трубосварочных баз, если между пунктами существуют большие расстояния.

### ОБОРУДОВАНИЕ ТРУБОСВАРОЧНЫХ БАЗ

Применение автоматической, полуавтоматической и ручной сварки на трубосварочных базах связано с использованием разнообразного оборудования, которое существенно влияет на степень механизации сборочно-сварочных процессов, на произво-

длительность труда и качество сварных соединений. Тщательность подгонки свариваемых труб на стенде — одно из основных условий получения равнопрочности швов. Сопряжение осей двух и более труб большого диаметра, свариваемых в секции, без специального оборудования практически невозможно.

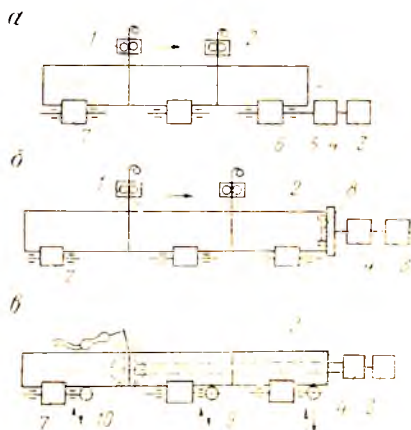
## Вращатели

Основное назначение вращателей при сварке заключается в непрерывном или периодическом изменении положения собранного стыка относительно сварочной головки для выполнения процесса в нижнем положении с регулируемой частотой вращения  $n$ . Вращатель должен обеспечить равномерную окружную скорость движения секции от  $v_{\min}$  до  $v_{\max}$  при заданном диаметре труб от  $D_{\min}$  до  $D_{\max}$  в следующем диапазоне:

$$n_{\min} = v_{\min} / (\pi D_{\max}); \quad n_{\max} = v_{\max} / (\pi D_{\min}).$$

Рис. 103. СХЕМЫ СВАРКИ ТРУБ С ПРИМЕНЕНИЕМ ВРАЩАТЕЛЕЙ:

а — роликового; б — торцового; в — центровочного; 1 — сварочный аппарат; 2 — секция труб; 3 — электродвигатель; 4 — редуктор; 5 — вал; 6 — приводной ролик; 7 — ведомый ролик; 8 — зажим торцового вращателя; 9 — ролик подъемный; 10 — внутренний центратор



Скорость сварки при неизменности других параметров режима ( $I$ ,  $U$ ) определяет поперечное сечение шва  $F_{\text{ш}} = I(v_{\text{св}})$  при  $I = \text{const}$ ,  $U = \text{const}$ . Поэтому неравномерное вращение секции может привести к образованию неравномерного поперечного сечения валика шва, что недопустимо. При выборе вращателя этот фактор учитывают и в зависимости от диаметра труб применяют вращатели различных типов. В трубопроводном строительстве применяют роликовые, торцовые и центровочные вращатели (рис. 103).

Вращатели первого типа обеспечивают окружную скорость секции труб с помощью приводных роликов, которые входят в контакт с внешней поверхностью труб.

**Роликовый вращатель** (рис. 104) используют для вращения секций труб диаметром 720—1420 мм при автоматической сварке на полустационарных и передвижных трубосварочных базах. Он состоит из двух обрезиненных роликов 5, которые соединяются с помощью валов 4 с распределителем мощности

3. Привод ведущих роликов осуществляется от электродвигателя переменного тока 1 и редуктора 2 или от двигателя постоянного тока. Система привода позволяет плавно или ступенчато регулировать частоту вращения трубы в процессе сварки. Плавное изменение частоты вращения трубы достигается с применением электромагнитных усилителей или тиристорных преобразователей.

*Расчет роликового вращателя.* Вращающий момент и мощность роликового вращателя определяют из условия, что ось вращения проходит через центр тяжести изделия. Мощность

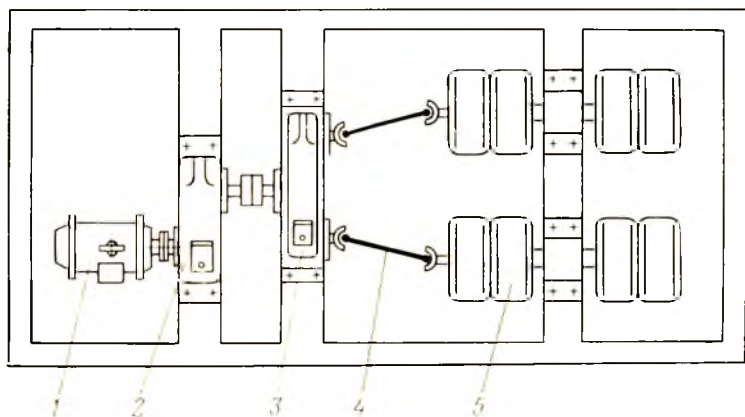


Рис. 104. СХЕМА РОЛИКОВОГО ВРАЩАТЕЛЯ

электродвигателя  $P$ , необходимая для работы роликового вращателя:

$$P = M_k \omega / (97360 \eta),$$

где  $M_k$  — крутящий момент привода роликового вращателя, Н·м;  $\omega$  — угловая скорость вращения секции, рад/с;  $\eta$  — к. п. д. системы передач от вала приводной роликовой опоры до вала двигателя,  $\eta = \eta_1 \eta_2 \dots \eta_n$ ,  $\eta_1, \dots, \eta_n$  — к. п. д. отдельных узлов или видов передач.

Крутящий момент привода роликового вращателя  $M_k$  приближенно определяют как сумму моментов трения качения роликов стэнда по секции труб  $M_1$  и трения на цапфах в подшипниках роликов  $M_2$ :  $M_k = M_1 + M_2$ . При пуске вращателя действуют сопротивление инерции масс и другие силы, которые учитывают соответствующим коэффициентом

$$M_k = (1,2 \div 1,3) (M_1 + M_2).$$

Момент трения качения для роликового вращателя (рис. 105, а) можно рассчитать по формуле

$$M_1 = \frac{G}{\cos \alpha} \frac{k}{r} (R + r), \quad (27)$$

где  $G$  — вес секции труб на одну роликовую опору;  $k$  — коэффициент трения качения (при трении стали о сталь  $k=0,005$  м);  $R$  и  $r$  — соответственно радиусы трубы и ролика. Их схемы (рис. 105, а)

$$\frac{G}{\cos \alpha} \frac{k}{r} = P_1.$$

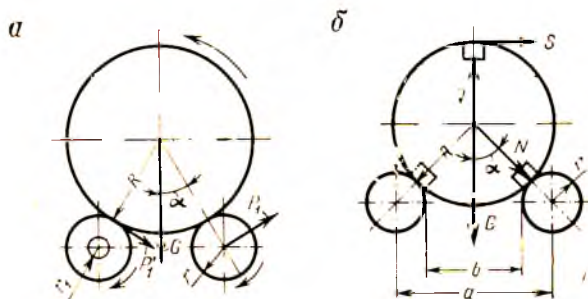


Рис. 105. СХЕМЫ К РАСЧЕТУ ДЕЙСТВУЮЩИХ УСИЛИЙ ПРИ ВРАЩЕНИИ ТРУБ

В этом случае

$$M_1 = P_1 (R + r). \quad (28)$$

Из формулы (28) можно установить, что с увеличением  $r$  уменьшается мощность двигателя, но по ряду причин величину  $r$  ограничивают.

Момент сил трения скольжения

$$M_2 = \frac{G}{\cos \alpha} f \frac{r_1}{r} R, \quad (29)$$

где  $f$  — коэффициент трения скольжения (для подшипников с бронзовыми вкладышами  $f=0,06 \div 0,08$ );  $r_1$  — радиус цапф осей роликов.

Под воздействием силы трения скольжения  $(G/\cos \alpha) f$  на границе контакта цапф с подшипниками возникает момент, равный  $(G/\cos \alpha) f_1 r$ , который при вращении роликов уравнивается моментом силы  $P_1'$ , т. е.

$$\frac{G}{\cos \alpha} f r_1 = P_1' r.$$

В этом случае

$$P_1' = \frac{G}{\cos \alpha} f \frac{r_1}{r}.$$

При вращении секций труб радиусом  $R$  получаем  $M_2 = P_1' R$  или формулу (29). Рассматривая формулы (27) и (29), можно установить, что с увеличением угла  $\alpha$  повышается приводной момент  $M_k$ . Для роликовых вращателей угол  $\alpha$  принимают равным 35—115°.

Необходимое условие вращения секций труб

$$\frac{M_k}{R} < \frac{G}{2 \cos \alpha} z_0,$$

где  $z_0$  — коэффициент сцепления между поверхностью труб и приводными роликами (без обрешиненных роликов с влажной поверхностью  $z_0 = 0,2$ ).

*Торцовый вращатель* используют для поворотной сварки секций труб диаметром 89—1220 мм. При помощи торцового вращателя конец секции труб зажимается по внешней или внутренней поверхности с помощью зажимного устройства, установленного на планшайбе. При этом ось планшайбы совмещается с осью трубы. На рис. 106 изображен типовой торцовый вращатель ВТ-61. Конец трубы закрепляется разжимными кулачками 5, установленными в самоцентрирующемся устройстве 6. Радиальное перемещение кулачков осуществляется при помощи выжимного конуса, который движется под действием штурвала 2. При освобождении трубы от вращателя кулачки убираются под действием пружин. Планшайбы в секции труб вращаются с помощью электродвигателя 4 и редуктора 3. При этом шестерня цилиндрического редуктора находится в зацеплении с планшайбой 1. Торцовый вращатель для обеспечения зажатия трубы перемещается на колесах 7 по направляющим рельсам 8. Регулирование скорости вращения секций может быть ступенчатое (сменными шестернями) и плавное (сопротивлением с пульта сварочной головки).

В зависимости от диаметра свариваемых труб применяют торцовые вращатели ВТ-61, ВТ-121 и др.

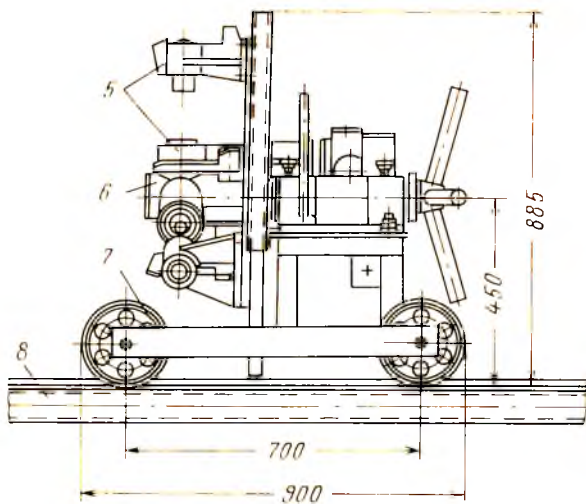
*Расчет торцового вращателя.* Необходимую мощность электродвигателя для вращения секции можно определить, используя формулу момента  $M$  трения при качении:

$$M = 2Nk(1 + R/r),$$

где  $N$  — сила, действующая на опору;  $k$  — коэффициент трения качения (при трении сталь о сталь  $k = 0,0005$  м);  $R$  и  $r$  — соответственно радиусы трубы и ролика опоры.

Диаметр ролика обычно бывает 100—200 мм, а его ширина 25—50 мм. Силу  $N$ , действующую на каждый ролик, определяем из схемы рис. 105, б:  $N = G/2 \cos \alpha$ , где  $G$  — вес трубы на одну опору;  $\alpha$  — угол между  $G$  и  $N$ . Для нормального вращения трубы рекомендуется между роликами устанавливать просвет  $b$ , равный  $(1 \div 1,2)R$ .





Мощность, необходимая для вращения секции:

$$P = M_c n / (729 \eta),$$

где  $M_c$  — момент сопротивления вращению всей секции,  $M_c = Mm$ ;  $m$  — число опор, удерживающих секцию при вращении;  $n$  — частота вращения секции;  $\eta$  — к. п. д. передачи торцового вращателя.

Число опор на стенде рассчитывают по допускаемой нагрузке на одну опору по формуле

$$N = G / [m \cos (\alpha / 2)].$$

Определим прижимное усилие при зажатии трубы кулачками вращателя. Прижимное усилие  $Q$  (см. рис. 105, б), создаваемое одним кулачком, можно найти из уравнения  $Q = S / f$ , где  $S$  — сила трения;  $f$  — коэффициент трения с учетом насечки на кулачках,  $f = 0,4$ . Силу трения  $S$  можно найти из уравнения момента кручения  $M_{кр} = SR$ . Так как  $M_{кр} = M_c$ , то прижимное усилие можно найти по формуле  $Q = M_c / (fR)$ .

Общее прижимное усилие при равномерном давлении кулачков  $\Sigma Q = 3Q$ .

Центровочный вращатель применяют на механизированных трубосварочных линиях. Он состоит из внутреннего гидравлического центратора, штанги, соединенной с центратором, и механизма вращения штанги с центратором.

Вращатель устанавливают на сборочно-сварочной линии неподвижно и трубы подают для сборки со стороны центратора. Собранная секция труб при сварке первого слоя шва поворачивается с помощью механизма вращения, который передает крутящий момент через штангу, центратор и его жилаки на внутреннюю поверхность трубы. Механизм вращения (рис. 107) имеет электродвигатель постоянного тока, редуктор и цеп-

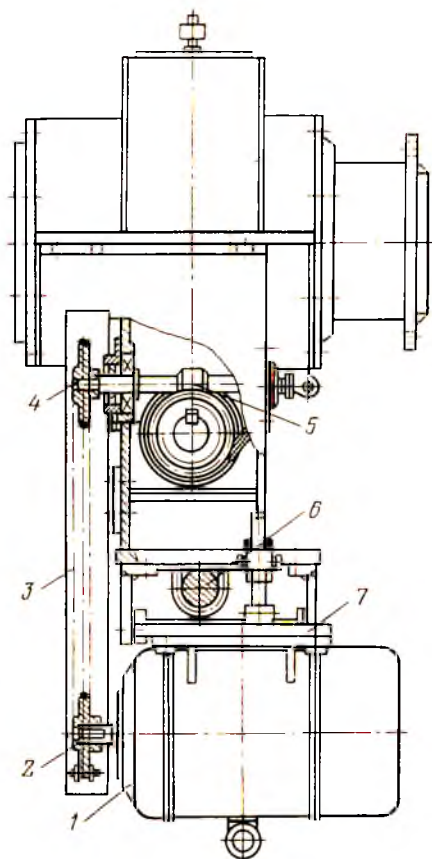


Рис. 107. МЕХАНИЗМ ВРАЩЕНИЯ

ную передачу. Электродвигателем постоянного тока, установленным на механизме вращения, управляют с помощью реостата, который позволяет плавно изменять частоту вращения секции. Для регулирования частоты вращения секции при установке электродвигателя переменного тока в цепной передаче устанавливают сменные пары звездочек. Вращение от электромотора 1 передается на звездочку 2, которая через цепь 3 вращает звездочку 4, установленную на валу червячного редуктора. Выходной вал этого редуктора 5 передает вращательный мо-

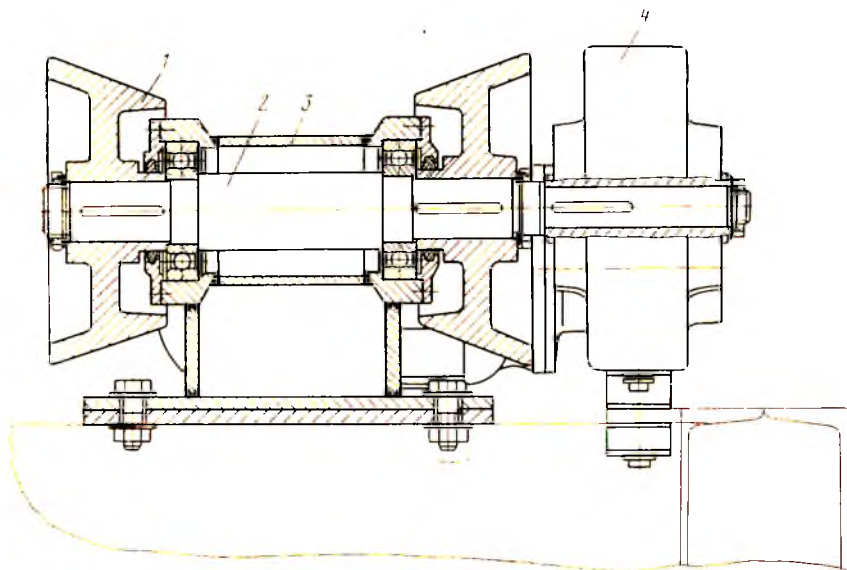


Рис. 108. ПРИВОД ПРОДОЛЬНОГО ПЕРЕМЕЩЕНИЯ

мент штанге, центратору и секции труб. Площадка 7 с установленным на ней электродвигателем может перемещаться, натягивая цепь с помощью винтового устройства. Для обеспечения колебания механизма вращения при подъеме и опускании штанги в конструкции имеется ось 6, которая позволяет совершать эти манипуляции.

### Привод продольного перемещения

Механизированные трубосварочные линии и специализированные трубосварочные базы имеют для возвратно-поступательного перемещения труб и секций привод продольного перемещения. На стенде устанавливают до десяти одинаковых по конструкции подобных приводов. Привод продольного перемещения (рис. 108) состоит из электродвигателя, двухступенчатого цилиндрического редуктора и двух приводных катков 1,

установленных на валу 2, который на подшипниках качения опирается на опору 3. Редуктор 4 устанавливают на выходном конце вала катков. К редуктору крепится электродвигатель мощностью 2,8 кВт с номинальной частотой вращения 1420 об/мин. В случае выхода из строя электродвигателя или редуктора катки можно использовать как холостые роlikо-опоры.

### Гидроподъемник

На механизированных трубосварочных линиях устанавливают до пяти гидроподъемников, представляющих собой подвижные опоры, на которых удерживается секция труб при

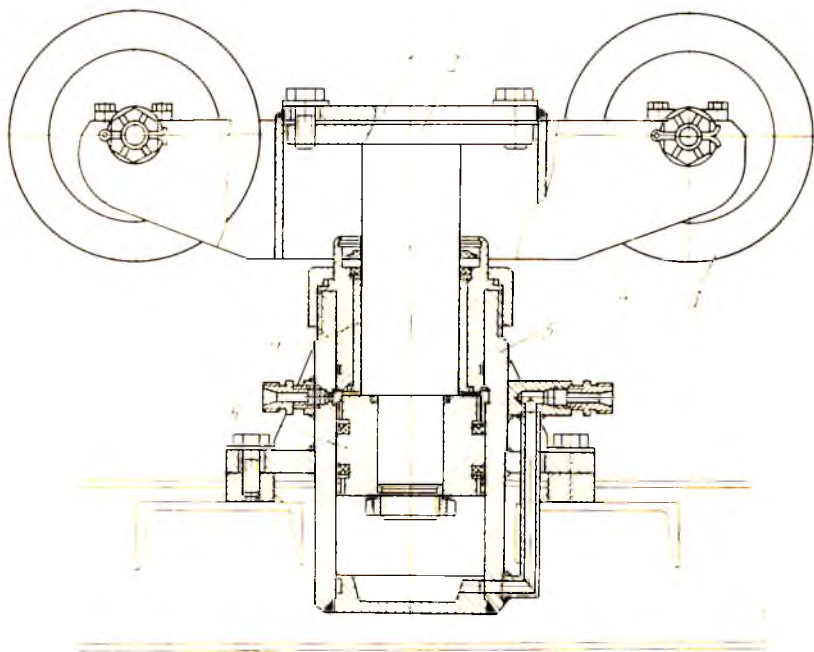


Рис. 109. ГИДРОПОДЪЕМНИК

сварке. Во время продольного перемещения труб катки гидроподъемников опускаются ниже уровня роликов продольного перемещения. Три или четыре гидроподъемника (в зависимости от конструкции линии) имеют ход до 80 мм и выполняют роль обычных подъемных опор. Один гидроподъемник имеет ход до 140 мм и используется для регулирования сварочного зазора. Гидроподъемник (рис. 109) состоит из следующих основных деталей: гидроцилиндра 5, подвижной траверсы 4 и катков 3. Подвижная траверса представляет собой сварную конструкцию, состоящую из двух щечек, соединенных ребрами

и плитой 1, которая болтами крепится к фланцу 2 штока гидrocиллиндра 7. На щечках делают пазы, в которые устанавливают оси катков. При работе с трубами различного диаметра оси катков устанавливают в требуемые пазы, которые соответствуют данному диаметру. Подъем траверсы с катками осуществляется давлением масла в системе, которое соответствует приблизительно 8 МПа. В цилиндр 5 масло подается из системы, и поршень 6, перемещаясь, вызывает вертикальный подъем штока 7 с роликами 3.

Исходные данные для расчета гидropодъемников: необхо-

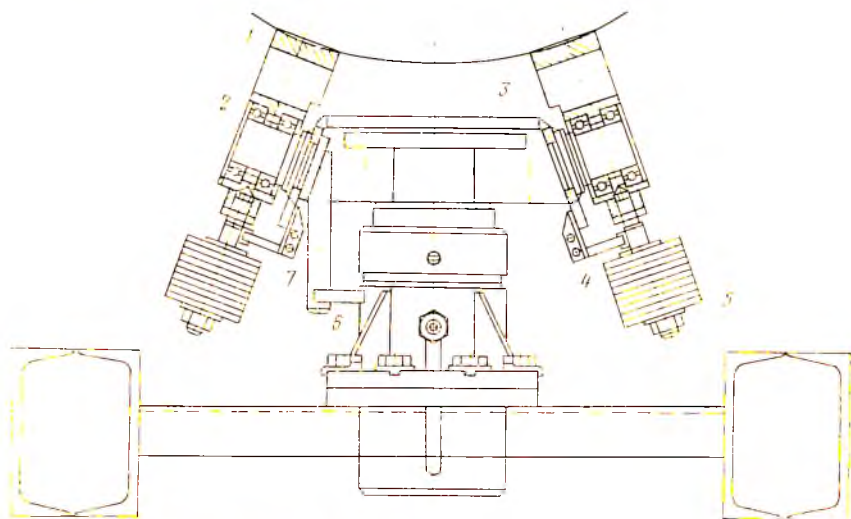


Рис. 116. ГИДРОПОДЪЕМНИК ШТАНГИ

димая сила на штоке  $P$ , ход поршня  $L$  и время рабочего хода  $t$ . Принимая давление масла в системе  $p$ , можно определить площадь поршня  $F = P/p$ . Диаметр цилиндра

$$D = \sqrt{4F/\pi} = \sqrt{4P/\pi p}.$$

Секундная подача насоса

$$Q = \frac{V}{t\eta_1} = \frac{FL}{t\eta_1} = \frac{PL}{pt\eta_1},$$

где  $V$  — объем цилиндра;  $F$  — площадь поршня;  $\eta_1$  — объемный к. п. д. системы, учитывающий утечки в золотнике и цилиндре,  $\eta_1 = 0,9$ .

Мощность, расходуемая на привод насоса:

$$N = \frac{736QP}{7500\eta_2} = \frac{736PL}{7500/\eta_1\eta_2},$$

где  $\eta_2$  — к. п. д. насоса и силового узла, равный 0,8—0,9.

### Гидроподъемник штанги

Гидроподъемник штанги (рис. 110) предназначен для поддержания штанги с центратором на уровне стыкуемой трубы. Кольца штанги опираются на опоры 1, которые установлены на осях 2 подвижной траверсы 3. Когда труба надвигается на центратор, оператор опускает гидроподъемник и труба беспрепятственно проходит над гидроподъемником штанги. Если эта операция не осуществлялась, то труба сама отклонит опоры и пройдет над ними. В исходное положение опоры возвращается с помощью противовесов 5, которые фиксируются в крайнем положении пластинчатой пружиной 4. Положение подвижной траверсы с опорами устанавливается по центру линии стержнем 7, который перемещается по пазу фиксатора 6, приваренного к цилиндру.

### Отсекатель

Отсекатель предназначен для передачи одиночных труб с приемного стеллажа на трубосварочную линию. На линии устанавливают два отсекаателя. Отсекатель имеет систему рычагов, шарнирно соединенных между собой (рис. 111). Система имеет сварную раму 1, состоящую из горизонтальных швеллеров, к которым приварены вертикальные стойки 2.

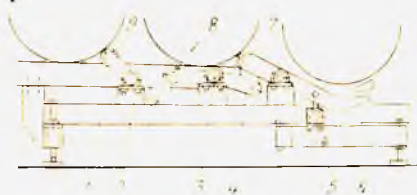


Рис. 111. ОТСЕКАТЕЛЬ

На них крепят опоры 3, имеющие подшипники скольжения. Опора, удерживающая трубы, может изменять свое положение в зависимости от различного диаметра свариваемых труб. Вся система рычагов приводится в движение штоком 6 гидравлического цилиндра 5, который соединяется с одним из рычагов. На штоке развивается усилие до 160 кН. При подаче масла в нижнюю полость цилиндра шток поднимает изогнутый рычаг, ролик 8, удерживающий трубу, опускается и она скатывается на саблевидный рычаг. Одновременно с опусканием ролика 8 поднимается ролик 7, который останавливает следующую скатывающуюся трубу. Далее масло подается в верхнюю полость цилиндра и изогнутый рычаг опускает трубу на ролики привода продольного перемещения. В это время опускается ролик 9 и пропускает вторую трубу до ролика 8, занявшего верхнее положение. Остальные трубы удерживаются роликом 7.

### Перегрузатель

На механизированной линии устанавливают два перегружателя. Их используют для сбрасывания сваренной секции с линии на промежуточный стеллаж. Перегрузатель (рис.



112) представляет собой изогнутый рычаг 1, который приводится в действие штоком 2 гидравлической системы. При подаче масла в нижнюю полость цилиндра 3 шток поднимает рычаг в верхнее положение и происходит сбрасывание секции на покати.

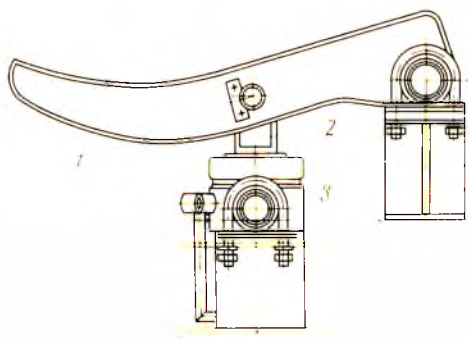


Рис. 112. ПЕРЕГРУЖАТЕЛЬ

### Роликовая опора

При поворотной сварке секции труб на полевых автосварочных установках вращение изделия осуществляется на роликовых опорах (рис. 113). Каждая опора имеет корпус 3,

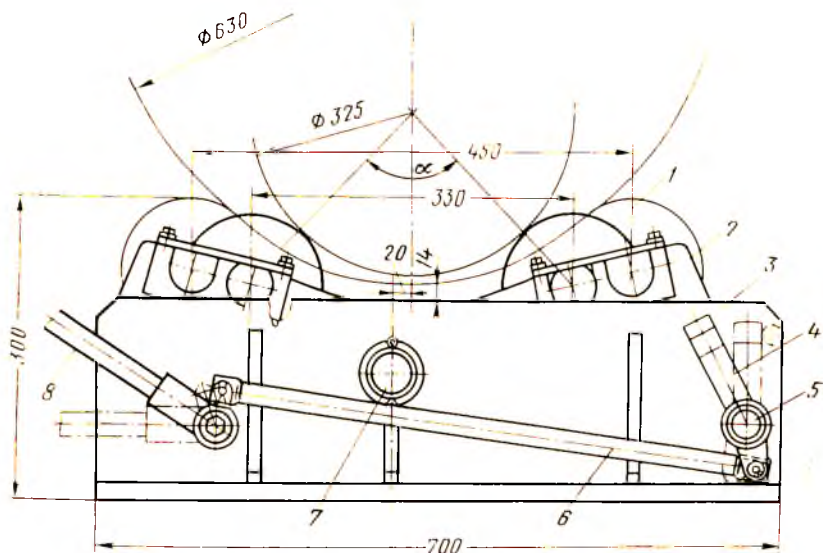


Рис. 113. РОЛИКОВАЯ ОПОРА

в котором на оси 7 установлено коромысло 2. На коромысле устанавливают два опорных ролика 1, расстояние между которыми может изменяться. Это расстояние определяется диаметром труб и устанавливается таким образом, чтобы центральный угол  $\alpha$  составлял  $70-90^\circ$ . Коромысло качается на оси 7 и может занимать два положения: оба опорных ролика находятся в горизонтальной плоскости (рабочее положение — сварка), правый ролик опущен (сброс готовой секции). Закрепляется коромысло в рабочем положении упором 4, установленным на оси 5 и приводимым в действие тягой 6 с помощью рычага 8.

Роликовые опоры крепят на стенде к двум параллельно расположенным швеллерам на расстоянии, которое можно установить исходя из нагрузки на одну опору. Раскладывая массу изделия на радиальные составляющие, получаем

$$R = G/[n \cos(\alpha/2)],$$

где  $R$  — радиальная нагрузка на одну опору;  $G$  — вес секции;  $n$  — число роликоопор стенда;  $\alpha$  — центральный угол.

### Тяговая лебедка

При сборке труб в секции на сборочном кондукторе используют тяговую лебедку для осевого перемещения одиночных труб. Применяемые на трассе лебедки ЛТ-ЗВ-1, ЛТ-ЗГ и ЛТ-82-1 развивают тяговое усилие 30 и 80 кН соответственно. Лебедка ЛТ-82-1 с тяговым усилием 80 кН предназначена для сборки труб диаметром 1020—1420 мм в секции. Лебедка имеет электродвигатель переменного тока мощностью 10 кВт, тормоз, редуктор, передающий вращение на барабан. Стягивание труб осуществляется с помощью каната крюком со скоростью 6,1 м/мин.

### Сборочные приспособления

Для сварочных баз сборочные приспособления выбирают в зависимости от конструкции базы. На простейших полевых базах секции собирают на кондукторе с помощью наружных многосвязных шарнирных или жестких одношарнирных центраторов. На механизированных базах секции собирают на рольгангах с применением внутренних центраторов.

### Машины для очистки и намотки проволоки

Для очистки и намотки электродной проволоки (в том числе омедненной) диаметром 1,2—5 мм применяют машину МОН-51. Проволока наматывается в кассеты и катушки диа-

метром до 350 мм. Проволоку без омеднения перед намоткой очищают подпружиненным стальным канатиком, который 2—3 раза оббивает движущуюся проволоку, двумя подпружиненными шлифовальными кругами и войлочными пластинами. Для очистки и намотки проволоки на кассеты больших диаметров применяют автоматизированную машину МОН-52.

## ПОЛЕВЫЕ АВТОСВАРОЧНЫЕ УСТАНОВКИ

Для поворотной сварки труб под слоем флюса на сварочных базах применяют специализированные полевые автосварочные установки ПАУ-601, ПАУ-602, ПАУ-1001 (ПАУ-1001В). Установку ПАУ-601 применяют для сварки труб диаметром 325—630 мм. Установка комплектуется торцовым вращателем ВТ-61, сварочным агрегатом АСДП-500ГФ, роликовыми опорами ОР-61, сварочной головкой СГФ-601 (СГФ-1004Б) и машинкой для очистки и намотки проволоки МОП-51. Полевая автосварочная установка ПАУ-602 представляет собой комплект механизмов для сварки заполняющих и облицовочных слоев швов поворотных стыков труб диаметром 720—1220 мм под флюсом на сварочных базах. Вращение труб осуществляется торцовым вращателем ВТ-121 на металлических роликоопорах ОР-121. В качестве источника питания сварочной головки СГФ-601 (СГФ-1004Б) применяется агрегат АСДП-500 ГФ. Для очистки и намотки проволоки на установке может использоваться машинка МОН-51. Применяемые на трассах сварочные установки ПАУ-1001 (ПАУ-1001В) позволяют осуществлять сварку секций труб диаметром 1020—1420 мм. Установки состоят из стенда с роликовым вращателем, двух отсекателей, двух сварочных головок СГФ-1004, что позволяет выполнять одновременно автоматическую сварку под флюсом двух стыков. Установки ПАУ-1004В комплектуют сварочной головкой ГДФ-1001-УЗ и выпрямителем ВДУ-1001-УЗ. На установке ПАУ-1001 (ПАУ-1001В) используют две передвижные по рельсовым путям будки. В каждой будке имеются освещение, отопление, устройство для просушивания флюса и вентиляция. Перемещение будки по рельсам, установка сварочной головки в рабочее положение и подъем ее осуществляются от электропривода. Для синхронной работы двух сварочных головок в будках устанавливают переговорные устройства. Электропитание сварочных постов производится от блока питания БПЗА, который имеет сварочный выпрямитель на 1000 А для автоматической сварки под флюсом и выпрямитель для ручной сварки. Зачистка кромок под сварку и снятие шлака осуществляются электронным инструментом от преобразователя частоты. Установка ПАУ-1001 (ПАУ-1001В) используется в районах с тяжелыми климатическими условиями (температура окружающего воздуха от  $-40$  до  $+50$  °С).

## КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТРУБОВАРОЧНЫХ БАЗ

Сборку в секции и сварку стыков осуществляют на полустационарных и передвижных трубосварочных базах, которые могут быть укомплектованы различными установками и оборудованием. Сварочные базы по степени механизации сборочных операций можно подразделить на несколько основных групп.

*Первая группа* объединяет полустационарные сварочные базы (рис. 114), которые осуществляют работу по сборке секций с малой степенью механизации. Эти базы часто используют для сборки и сварки труб диаметром 529—1020 мм. Для

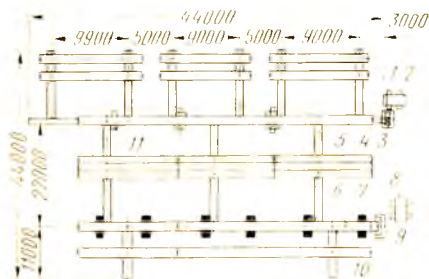


Рис. 114. СХЕМА ПРОСТЕЙШЕЙ ТРУБОВАРОЧНОЙ БАЗЫ:

1 — направляющие приемного стеллажа; 2 — сварочный агрегат АДД-502-У-1; 3 — лебедка; 4 — сборочный кондуктор; 5 — направляющие промежуточного стеллажа; 6 — секция на сварочном стенде; 7 — роликовые опоры; 8 — электростанция ДЭС-100; 9 — торцовый вращатель; 10 — направляющие стеллажа для сваренных секций; 11 — перегрузчик

сборки секций трубы подают на приемный стеллаж, где осуществляют подготовительные операции (очистка внутренней полости и наружной поверхности трубы, зачистка кромок до металлического блеска, правка плавных вмятин). Далее трубы поступают на сборочный стеллаж, где с помощью лебедки и наружных центраторов их собирают в секции на прихватках с частичной ручной сваркой первого слоя (на  $\frac{2}{3}$  периметра). Затем секции труб подают на промежуточный стеллаж для полной сварки первого слоя шва, которая проводится вручную или полуавтоматами в среде углекислого газа. Для сварки последующих слоев шва под слоем флюса секции пакуют на роликоопоры сварочного стенда, который представляет собой полевую автосварочную установку ПАУ-601. Основными элементами этой установки являются вращатель, роликовые опоры, сварочная головка и сварочный агрегат. Секцию закрепляют в торцовом вращателе, который осуществляет вращение ее в процессе автоматической сварки под слоем флюса. Сварка стыков труб ведется сварщиком и его подручным, которые по окончании работ на одном стыке переходят к другому. После окончания сварки последнего стыка труб сварочную головку поднимают, сварщик с подручным отходят, секцию освобождают от вращателя, на роликовых опорах переводится предохранительный рычаг для сброса готовой сек-

ции, и она попадает на стеллаж для контроля. Средняя производительность сварочной базы — 24—84 стыков в смену.

Вторая группа объединяет серию полустационарных сварочных баз (рис. 115), которые состоят из механизированных трубосварочных линий (МТЛ) и полевых автосварочных установок (ПАУ). Трудоемкие процессы при сборке труб в секции (накатывание одиночных труб, сближение труб, установка зазора, вращение секции, скатывание секции) на трубосвароч-

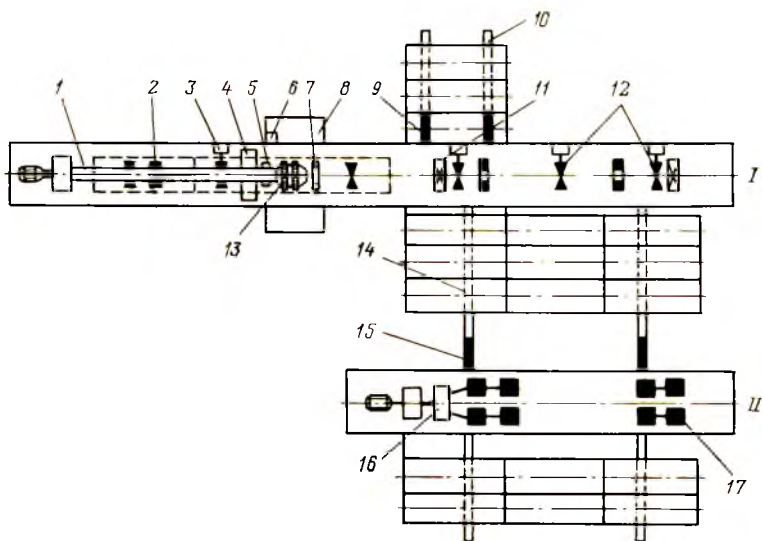


Рис. 115. СХЕМА ТРУБОСВАРОЧНОЙ БАЗЫ С ЛИНИЕЙ МТЛ И УСТАНОВКОЙ ПАУ:

I — линия МТЛ; II — установка ПАУ; 1 — вращатель; 2, 12, 17 — ролики; 3 — привод продольного перемещения; 4 — гидропривод; 5 — гидроподъемник штанги; 6 — пульт управления; 7 — гидроподъемник; 8 — кабина управления; 9, 15 — отсекатели; 10 — приемный стеллаж; 11 — перегружатель; 13 — промежуточный стеллаж; 14 — внутренний центратор; 16 — роликовый вращатель

ных линиях механизированы, и управление осуществляется дистанционно. Для комплектования баз применяют механизированные трубосварочные линии МТЛ-10, МТЛ-121 и МТЛ-141, на которых осуществляют сварку труб диаметром 720—1420 мм. Технологический процесс сборки и сварки секций на трубосварочных линиях осуществляется следующим образом. В начале работы трубы укладывают трубоукладчиком на приемный стеллаж 10, где проводятся подготовительные операции. Затем труба при помощи отсекателя 9 отделяется от остальных труб, передается на рольганги продольного перемещения труб 12 и надвигается на центратор 14. При этом гидроподъемник штанги 5 опускается и центратор вводится в трубу. После установки первой трубы на позицию сварки



разжимается левый ряд жимков центратора. На освободившееся место подобным образом подается вторая труба, которая перемещается по роликам до соприкосновения с первой трубой, и после установки зазора разжимается правый ряд жимков центратора. На освободившееся место подобным образом подается вторая труба, которая перемещается по роликам до соприкосновения с первой трубой, и после установки зазора разжимается правый ряд жимков центратора. Сцентрированные трубы поднимаются гидроподъемниками 2 над роликами 12, и выполняется поворотная сварка стыка. После этого секция из двух труб освобождается от центратора, опускается на роликанг и по роликам перемещается вправо, освобождая место для приема третьей трубы. Третья труба отсекается подаётся на линию и вместе с двухтрубной секцией перемещается на позицию сварки, где осуществляется центровка, прихватка и сварка первого слоя на двух стыках. Сваренная трехтрубная секция перемещается вправо на позицию сбрасывания. Секция поднимается перегружателями 11 и передается на промежуточный стеллаж 13. Сборочно-сварочные работы на механизированных трубосварочных линиях ведутся в освещенной кабине, что позволяет вести работы в две смены и при плохой погоде. Сварка первого слоя ручными или полуавтоматическими методами обеспечивает получение качественного сварного соединения, так как процесс ведется в укрытии и всегда в нижнем положении. Сварку последующих слоев швов выполняют под флюсом на полевых автосварочных установках ПАУ-601, ПАУ-602, ПАУ-1001 (ПАУ-1001В), где секция накачивается на роликоопоры. Вращение секции осуществляется торцовым или роликовым вращателями. Наружная сварка швов может осуществляться одновременно двумя автоматами, что повышает производительность сварочной установки. Подварка стыков внутри секции (при сварке труб повышенной прочности) выполняется автоматом АДФ-1001 после окончания предыдущих работ. Для повышения темпа сварочных работ на базе подварка стыков внутри секции выполняется на отдельном стенде (например, СВР-142 и т. п.). Полностью сваренные стыки секций труб контролируют на стеллажах готовой продукции и вывозят на трассу.

Подустановочные сварочные базы *третьей группы* имеют сборочные стенды ССТ-141, на которых осуществляют сборку секций. Последующая автоматическая сварка под слоем флюса происходит на полевых автосварочных установках ПАУ-602, ПАУ-1001 (ПАУ-1001В) или с использованием роликового вращателя СВР-142 (рис. 116). Эти базы применяют для сборки и сварки труб диаметром 1020—1420 мм. Трубы собирают в секции после подготовительных операций. Три трубы отсекаем 4 подают на роликоопоры стенда. Сближение и установка зазора осуществляется при помощи лебедки 1, ко-



торая установлена на стенде. При подаче троса на барабан лебедки лоток упирается в трубу и перемещает ее до соприкосновения другой трубы с упором 6. Для создания равномерного зазора по всему периметру труб осуществляется их подъем или смещение с оси стенда манипуляторами 5. Далее в трубы пропускают самоходный центратор 2 и с его помощью собирают трубы для прихватки. На стенде можно собирать одновре-

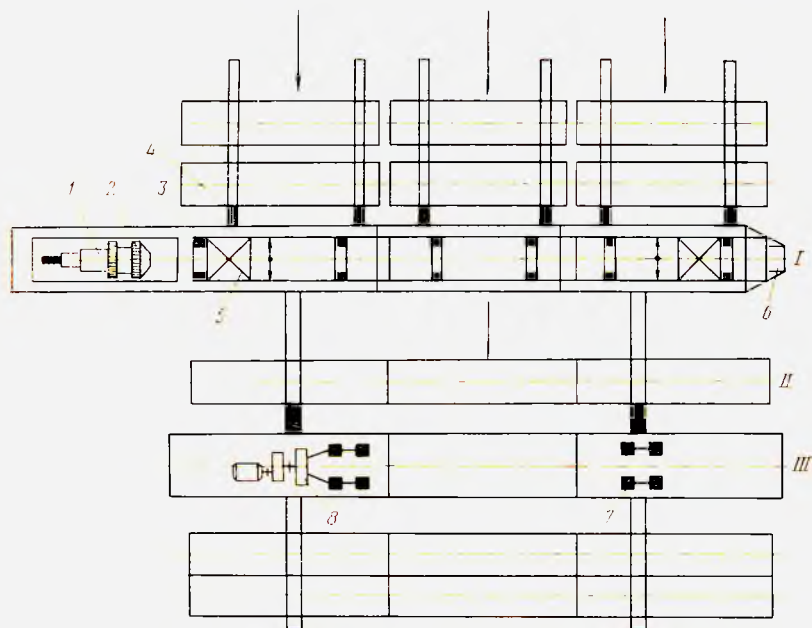


Рис. 116. СХЕМА ТРУБОСВАРОЧНОЙ БАЗЫ СО СБОРОЧНЫМ СТЕНДОМ ССТ-141 И УСТАНОВКОЙ ПАУ-1001В:

I — сборочный стенд; II — промежуточный стеллаж; III — установка ПАУ; 1 — лебедка; 2 — внутренний центратор; 3 — роликовая опора; 4 — отсекающий; 5 — манипулятор; 6 — упор; 7 — ролики; 8 — роликовый вращатель

менно два стыка трехтрубной секции, для чего применяют два центратора. Сборку секций можно выполнять как с помощью внутренних (гидравлического, электромеханического), так и наружных центраторов. При сборке секций диаметром 1420 мм применяют только внутренние центраторы и после прихватки проводят неповоротную ручную сварку корневого слоя шва. Затем секцию подают на промежуточный стеллаж II, где проводят ручную сварку небольшого участка стыка, который при сборке на стенде оказался внизу, после чего секция поступает на стенд автоматической сварки III. Для поворотной сварки используют установку ПАУ, а также можно применять стенд СВР-142. Секции диаметром 1420 мм для автоматической

сварки заполненных слоев шва могут непосредственно поступать на роlikоопоры установки ПАУ-1001 (ПАУ-1001В) или стенд СВР-142, что позволяет сократить операцию по перекачиванию секций на промежуточном стеллаже. Для внутренней подварки корня шва сварочная база может быть дополнена еще одним роlikовым вращателем СВР-142 или другим стендом подобной конструкции.

Полустационарные специализированные базы четвертой группы используют для сборки и соединения труб в секции с применением двусторонней сварки. Существуют три моди-

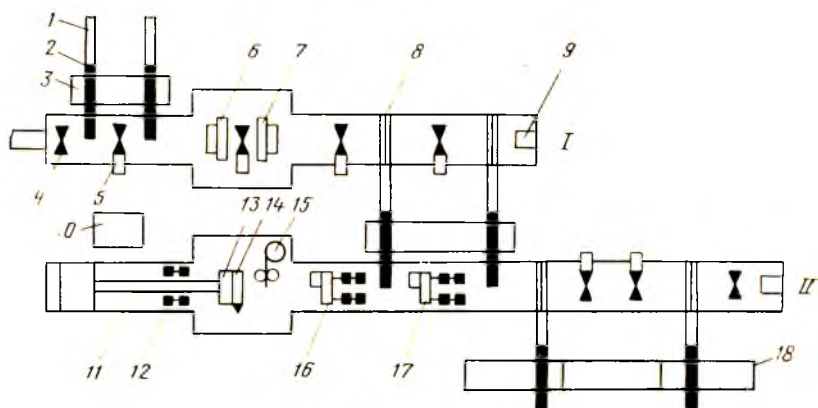


Рис. 117. СХЕМА ТРУБОВАРОЧНОЙ БАЗЫ БТС-142В:

1 — линия обработки кромок труб; 11 — линия сварки труб в секции; 1 — накопитель труб; 2 — отсекающий труб; 3 — труба; 4 — транспортная опора; 5 — транспортная опора с приводом; 6, 7 — станки подготовки кромок; 8 — перегружатель; 9 — упор; 10 — блок питания; 11 — штанга; 12 — роlikи; 13 — центратор; 14 — внутренняя сварочная головка; 15 — наружная сварочная головка; 16, 17 — роlikовые вращатели; 18 — секция из труб

фикации этих баз. Трубосварочную базу БТС-142В используют для изготовления секций из двух-трех труб диаметром 1020—1420 мм; базу БТС-143 применяют для двух- и трехтрубных секций того же диаметра, а база БТС-71 служит для сварки труб диаметром 720—1020 мм в двух- и трехтрубные секции. На трубосварочной базе БТС-142В трубы из накопителя 1 поступают на стенд обработки кромок I, состоящий из двух станков 6 и 7 для обработки кромок СПК (рис. 117). После обработки торцов трубы подают на стенд сварки наружного и внутреннего швов II, где проводят сборку стыка внутренним центратором 13, установленным на штанге 11. Последовательность поступления труб на стенд, их сборка осуществляются аналогичным образом, как на линиях МТЛ. В зависимости от принятой технологии сварки можно накладывать один или два слоя шва наружной головкой 15 (типа ГДФ-1001-УЗ), поворачивая секцию вращателем 16. Центровку и сварку выполняют

в будке, которая установлена неподвижно над стыком. Далее выполняют сварку внутри секции. Сварочная головка 14 для внутренней сварки установлена на конце штанги, которая находится внутри секции. Сварщик, находясь в будке, дистанционно следит за процессом сварки, регулирует параметры режима и положение электрода относительно стыка. Неиспользованный флюс удаляется из секции флюсоотсасывающим аппаратом. По окончании сварки стыка секция перемещается на линии транспортными устройствами в конец стеллажа II. Следующую трубу с подготовленной кромкой подают со стеллажа

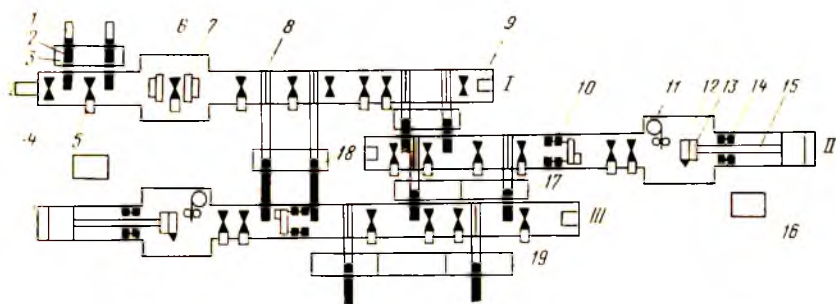


Рис. 118. СХЕМА ТРУБОСВАРОЧНОЙ БАЗЫ БТС-143:

I — линия обработки кромок; II — линия сварки двухтрубных секций; III — линия сварки трехтрубных секций; 1 — накопитель труб; 2 — отсекаль труб; 3 — труба; 4 — транспортная опора; 5 — транспортная опора с приводом; 6, 7 — станки подготовки кромок; 8 — перегружатель; 9 — упор; 10 — роликовый вращатель; 11 — наружная сварочная головка; 12 — внутренняя сварочная головка; 13 — центратор; 14 — ролики; 15 — штанга; 16 — блок энергоснабжения; 17 — секция из труб; 18 — труба с подготовленной кромкой; 19 — секция из трех труб

I на линию сварки и осуществляют сборку и сварку второго стыка. После сварки второго стыка секцию 18 передают на контроль.

Трубосварочные базы БТС-143 и БТС-71 работают по другой схеме (рис. 118). Трубы поступают на стэнд обработки кромок I. Обработку кромок выполняют двумя станками СПК, которые в будках подвешены на электрических талях. Система крепления и перемещения станков позволяет беспрепятственно перемещать трубы на линии обработки кромок. Первую трубу обрабатывают станком 7, вторую — станком 6. Далее первая труба проходит по роликам продольного перемещения 4 и 5 в конец стэнда I, а затем на линию сварки двухтрубных секций II. Вторую трубу перемещают от станка обработки кромок 6 к станку 7, обеспечивая обработку второго торца, после чего она, как и первая труба, поступает на стэнд сварки II. Третью трубу обрабатывают станком 6, а затем подают на стэнд сварки трехтрубных секций III. Сварочный стэнд двухтрубных секций имеет рольганг продольного перемещения, приводные 5 и холостые 4 роликовые опоры, двенадцатиметровую

штангу 15, на конце которой укреплены центратор 13 и головка 12 для сварки стыка внутри трубной секции, и будку, в которой установлена головка для наружной сварки 11 и аппаратура управления перемещением труб и двухтрубной секции в пределах стенда, центровкой, внутренней и наружной сваркой. Первую трубу, поступающую на стенд, надвигают на штангу и закрепляют центратором. Вторую трубу подают до соприкосновения с первой и выполняют центровку и закрепление. После центровки выполняют сварку наружной головкой, после чего разжимают центратор и перемещают штангу внутри секции так, чтобы конец электродной проволоки внутренней сварочной головки находился в центре стыка. Сварку второго наружного слоя шва выполняют одновременно со сваркой внутреннего слоя шва. Оператор регулирует положение электрода при сварке внутри секции по кольцевой риске, которая находится на наружной поверхности трубы и наносится во время подготовки кромок. За положением электрода в разделке кромок следит сельсин-система. Секцию вращают при помощи роликового вращателя 10. Полностью сваренную двухтрубную секцию передают на стенд III, где на центраторе к этому времени закреплена третья труба после обработки. Оборудование стенда III аналогично оборудованию стенда II, и выполняемые сборочно-сварочные работы аналогичны. Длина стенда III позволяет разместить трехтрубную секцию. Полностью сваренную трехтрубную секцию перемещают на линию контроля и ремонта сварных соединений.

Полустационарные сварочные базы пятой группы комплектуют электроконтактными установками.

### ПОВОРОТНАЯ СВАРКА СЕКЦИЙ ТРУБ

При разработке технологии поворотной сварки стыков секций труб и выборе режимов для ручной, полуавтоматической, автоматической сварки необходимо учитывать особенности подготовки кромок под сварку и марку трубной стали. Поворотную сварку секций труб из малоуглеродистых и низколегированных сталей (с пределом прочности до 550 МПа) чаще выполняют на линиях МТЛ и установках ПАУ. Кромки труб с толщиной стенки до 17 мм имеют скос 30—35° и притупление 1—2,5 мм. Трехтрубные секции собирают на стендах (линиях) сварочной базы с помощью внутренних центраторов. Для обеспечения провара корня шва между кромками труб устанавливают необходимый зазор, который колеблется от 1,5 до 3,5 мм (в зависимости от вида покрытия электрода). Ручная сварка корневого слоя производится электродами марки ХОНИ-13/55 диаметром 3—4 мм или ВСЦ-4 диаметром 4 мм. Сварку первого слоя обычно выполняют снаружи трубы, но при соответствующем соблюдении правил техники безопасно-

сти допускается подварка корня шва внутри трубы. В конце сварки необходимо во избежание образования трещин полностью заплавлять кратер шва и перекрывать его последующим швом на 10—15 мм. Сварку первого слоя в среде углекислого газа обычно выполняют полуавтоматами А-547Р, А-537Р, А-547У, А-1230М и др. Сварку ведут в направлении сверху вниз углом назад с опиранием газового сопла полуавтомата на кромки. Первый слой шва, во избежание получения прожогов при автоматической сварке под слоем флюса, должен иметь толщину не менее 4 мм. При сварке между трубами устанавливают зазор 2—2,2 мм. При меньшем зазоре сварка в среде защитного газа приводит к несплавлению в корне разделки шва. После сварки корневого шва последующие слои выполняют на установках ПАУ с применением автоматической сварки под слоем флюса. Автоматическую сварку секций труб под флюсом производят в два — четыре слоя в зависимости от толщины стенки.

Поворотную сварку секций труб из низколегированных сталей (с пределом прочности более 550 МПа) осуществляют на стендах сварочных линий МТЛ, установках ПАУ и базах БТС. Трубы повышенной высокой прочности из дисперсионно-твердеющих сталей (с пределом прочности 550—750 МПа) склонны к образованию трещин. При ручной сварке первого слоя шва металл труб предварительно подогревают и тем самым снижают скорость охлаждения в области субкритического интервала температур.

Трубы собирают в секции для выполнения первого ручного или полуавтоматического шва на стендах трубосварочных линий с применением внутреннего центризатора. Зазор при сварке первого слоя шва должен составлять 1,5—3,4 мм. Допускаемое смещение кромок не должно превышать 25 % от толщины стенки. После сборки стыка предварительно подогревают кромки до температуры 200 °С (в зависимости от марки стали). В качестве подогревающего устройства используют пропановые кольцевые горелки с равномерной расстановкой сопел по периметру стыка. Горелки устанавливают в центре стыка с таким расчетом, чтобы обе стыкуемые трубы были равномерно нагреты до расчетной температуры по всему периметру на расстоянии от края торцов не менее 150 мм. В процессе нагрева температуру контролируют с помощью термокарандашей или термокрасок. После нагрева производится ручная сварка первого слоя шва одновременно двумя сварщиками. Перерывы в работе сварщиков не допускаются. При вынужденном перерыве более 10 мин требуется проводить повторный подогрев. Автоматическую сварку последующих слоев шва под флюсом выполняют с применением установки ПАУ или станков с роликовыми вращателями. Автоматическую сварку под слоем флюса выполняют при толщине стенки трубы 17—



17,5 мм не менее чем в три слоя, а для труб с толщиной стенки 20—20,5 мм — не менее чем в четыре слоя. После сварки наружных слоев шва секцию труб перемещают на другой стэнд, где осуществляют внутреннюю подварку корня шва под флюсом автоматом АДФ-1001 и т. п.

Наиболее эффективным методом сварки поворотных стыков с толщиной стенки 17—20,5 мм является автоматическая двусторонняя сварка под флюсом. Для повышения производительности процесса изменяют геометрию кромок. Стыки собирают без зазора с помощью внутреннего центратора. При автоматической двусторонней сварке под флюсом выполняют вначале снаружи один слой, а затем второй и один слой внутри труб.

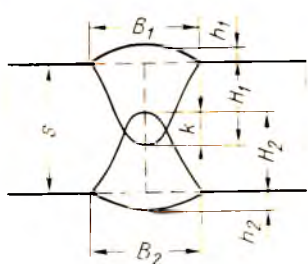


Рис. 119. ДВУСТОРОННЯЯ СВАРКА СТЫКОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ БЕЗ РАЗДЕЛКИ КРОМОК

При выполнении двусторонних швов стыковых соединений (шириной  $B_1$ ,  $B_2$  и высотой усиления  $h_1$  и  $h_2$ ) без скоса кромок определяют глубину провара (рис. 119) с одной стороны:  $H_1 = s/2$ . Глубину провара при сварке с одной стороны часто задают на 2—3 мм больше половины сечения. Требуемый сварочный ток устанавливают, обеспечивая заданную глубину проплавления:  $I = 100H_1/k$ , где  $H_1$  — необходимая глубина провара при сварке с одной стороны;  $k$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от условия проведения сварки

(см. табл. 14). Диаметр электродной проволоки ориентировочно определяют по формуле  $d_s = 1,13 \sqrt{I/j}$ , где  $j$  — допускаемая плотность тока. При автоматической сварке стыковых соединений без скоса кромок допускаемая плотность тока зависит от диаметра электрода:

|                                   |        |       |       |       |       |
|-----------------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|
| $d_s$ , мм . . . . .              | 2      | 3     | 4     | 5     | 6     |
| $j$ , А/мм <sup>2</sup> . . . . . | 65—200 | 45—90 | 35—60 | 30—50 | 25—45 |

Для сохранения геометрического подобия сварочной ванны требуется, чтобы коэффициент формы ванны оставался неизменным:  $\varphi = L/B = \text{const}$ , где  $L$  — длина ванны;  $B$  — ширина ванны. Если значения  $L$  и  $B$  определить согласно теории распространения теплоты при сварке, то получим

$$\varphi = \frac{1}{4\lambda} \sqrt{\frac{Bc\rho}{2\pi T_{пл}}} \sqrt{qv_{св}} = A' \sqrt{qv_{св}} = \text{const}.$$

Следовательно, для сохранения геометрического подобия ванны произведение  $Iv_{св}$  должно поддерживаться в определенных пределах  $Iv_{св} = A$ . Поэтому скорость сварки можно установить из формулы  $v_{св} = A/I$ .



Для получения швов требуемой формы, обладающих высокой технологической прочностью, значение  $A$  принимают в следующих пределах:

|                       |                           |                           |                           |
|-----------------------|---------------------------|---------------------------|---------------------------|
| $d_3$ , мм . . . . .  | 1,2                       | 1,6                       | 2                         |
| $A$ , А·м/ч . . . . . | $(2 \div 5) \cdot 10^3$   | $(5 \div 8) \cdot 10^3$   | $(8 \div 12) \cdot 10^3$  |
| $d_3$ , мм . . . . .  | 3                         | 4                         | 5                         |
| $A$ , А·м/ч . . . . . | $(12 \div 16) \cdot 10^3$ | $(16 \div 20) \cdot 10^3$ | $(20 \div 25) \cdot 10^3$ |
| $d_3$ , мм . . . . .  |                           | 6                         |                           |
| $A$ , А·м/ч . . . . . |                           | $(25 \div 30) \cdot 10^3$ |                           |

Необходимое напряжение дуги с учетом диаметра электрода и сварочного тока вычисляют по формуле

$$U = 20 + \frac{50 \cdot 10^{-3}}{d_3^{0,5}} I \pm 1.$$

Полученные параметры сварочного процесса используют для вычисления погонной энергии и основных размеров шва. Если глубина провара и другие размеры шва удовлетворяют поставленным требованиям, то подобным образом рассчитывают режимы сварки шва, свариваемого с противоположной стороны, и в случае необходимости проводят корректировку режима. Сварные соединения со скосом кромок рассчитывают аналогично.

Для стыковых двусторонних швов, выполняемых за несколько проходов, определяют режим сварки первого прохода, обращая внимание на получение требуемого значения проплавления

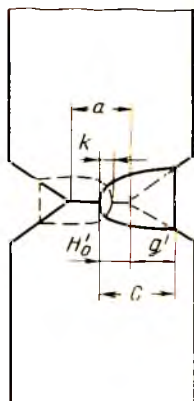


Рис. 120. ПРОПЛАВЛЕНИЕ КРОМОК ТРУБ ПРИ ДВУСТОРОННЕЙ СВАРКЕ

$H'_0$  притупления  $a$  (рис. 120), которое желательно иметь максимально возможным. Однако при сварке одним проходом на чрезмерно больших токах можно получить форму провара, создающую неблагоприятные условия кристаллизации, приводящей к образованию горячих трещин. Для этого допустимую плотность тока в электроде ограничивают так: для  $d_3=5$  мм  $j \leq 46$  А/мм<sup>2</sup>, а для  $d_3=6$  мм  $j \leq 40$  А/мм<sup>2</sup>. Проплавление  $H'_0$  притупления  $a$  определяют, полагая, что при сварке на принятом режиме общая высота шва  $C$  остается неизменной:  $H'_0 = C - g'$ , где  $g'$  — высота заполнения разделки за один проход с дальнейшим перекрытием  $k$ :

$$g' = \sqrt{(F_n - Cb) / \operatorname{tg}(\alpha/2)},$$

где  $F_n$  — площадь поперечного сечения металла, наплавленного за данный проход;  $C$  — общая высота шва;  $b$  — зазор в стыке;  $\alpha$  — угол разделки кромок.

Режим сварки последующих проходов и их число выбирают из условия заполнения разделки и получения поверхности шва, имеющей плавное сопряжение с основным металлом.

*Производительность трубосварочных баз.* Часовую производительность сборочно-сварочной установки можно определить из равенства

$$N = 60/t = 60/(t_c + t_v),$$

где  $t$  — время наиболее продолжительной операции;  $t_c$  — время сварки;  $t_v$  — вспомогательное время, затрачиваемое в расчете на один стык.

При автоматической поворотной сварке трубопроводов под слоем флюса на базе время сварки определяется из формулы

$$t_c = \frac{60\pi D}{m} \sum_{i=1}^n \frac{1}{v_{icв}},$$

где  $D$  — диаметр трубы;  $m$  — число одновременно горящих дуг при сварке слоя шва;  $n$  — число слоев шва;  $v_{icв}$  — скорость сварки  $i$ -го слоя.

---

## Глава 12

### ЭЛЕКТРОКОНТАКТНАЯ СВАРКА ТРУБОПРОВОДОВ

Электроконтактная сварка оплавлением относится к пресовым методам сварки трубопроводов и предусматривает нагрев места соединения до высокой температуры с последующим осевым сдавливанием. Сварное соединение получается одновременно по всему периметру стыка, что позволяет механизировать сварочные работы на трассе и приблизить их выполнение к заводскому поточному производству.

#### ПРОЦЕСС СТЫКОВОЙ СВАРКИ ОПЛАВЛЕНИЕМ

При электроконтактной сварке оплавлением находящиеся под током трубы сближаются до соприкосновения торцов. Первоначальное касание практически осуществляется в точке. Поверхность соприкосновения за короткий промежуток времени резко возрастает за счет относительного перемещения деталей, пластической деформации контактирующих неровностей и теплового расширения металла в зоне контакта. Металл резко нагревается в средней части контакта и превращается в жидкую перемычку. Электрическое сопротивление контакта в начальный период нагрева изменяется сравнительно равномерно,

но в процессе расплавления металла оно резко возрастает с большой скоростью. В процессе плавления перемычки объем и форма металла не остаются постоянными. Они изменяются вследствие плавления металла, перемещения перемычки по оплавленной поверхности, сжатия объема электродинамическими силами и выделения паров и газов из перегретого металла. Перемычка разрушается либо под действием электродинамической силы (рис. 121), либо за счет перегрева металла. Сила  $F_1$  представляет сумму всех объемных сил

$$d\vec{f} = [\vec{j} \cdot \vec{B}] dV,$$

где  $\vec{j}$  — плотность тока;  $\vec{B}$  — магнитная индукция;  $dV$  — элементарный объем перемычки. Данная сила стремится выбросить перемычку за пределы сварочного контура. Если в рассматриваемый момент существует несколько контактов, то в них возникают силы, которые стремятся сблизить эти контакты. Они имеют вид

$$\vec{F}_2 = \vec{F}_2' = I \cdot \vec{B}' = I \cdot \vec{B}'',$$

где  $\vec{I}'$  и  $\vec{I}''$  — точки, проходящие через перемычки;  $\vec{B}'$  и  $\vec{B}''$  — магнитные индукции, создаваемые токами.

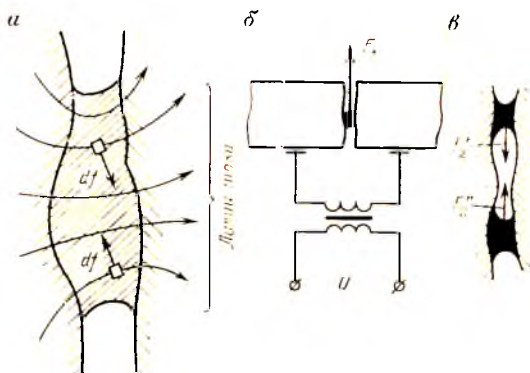


Рис. 121. СХЕМА ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ СИЛ НА СВАРИВАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЯХ:

*a* — элементарные объемные силы; *б* — результирующая сила; *в* — силы взаимодействия

Объединение перемычек приводит к увеличению размеров кратеров, образующихся в результате разрушения объемов жидкого металла.

В результате разрушения одних элементарных контактов ток перераспределяется в другие, что приводит к повышению напряжения. При разрушении единичной перемычки электрическая цепь не разрывается мгновенно, а накопленная энергия

магнитного поля  $W = Li^2/2$  (где  $L$  — индуктивность;  $i$  — ток при разрушении перемычки) должна превратиться в тепловую энергию. При этом напряжение между изделиями повышается до зажигания и последующего горения дуги. До зажигания дуги электрический процесс можно описать приближенным уравнением

$$U_2 = L \frac{di}{dt} + i(R + R_k),$$

где  $U_2$  — вторичное напряжение;  $R$  — сопротивление сварочной цепи;  $R_k$  — активное сопротивление жидкой перемычки.

После разрушения контакта уравнение имеет вид

$$U_2 = L \frac{di}{dt} + iR + U,$$

где  $U$  — напряжение дуги.

Время существования элементарного контакта зависит от напряжения. Повышение напряжения приводит к увеличению количества дуговых разрядов и их интенсивности. Время существования контакта зависит от материала свариваемого изделия. Для цветных металлов время существования элементарных контактов наименьшее. Во время оплавления поверхность нагрева покрыта кратерами различных размеров и количество контактов колеблется в широких пределах. Наличие перемычек и электрических разрядов в процессе сварки оплавлением приводит к тому, что сварочный ток несинусоиден и усредненную мощность машины можно определить по формуле

$$P = U_2 I \chi \cos \varphi \frac{1}{\eta}, \quad (30)$$

где  $U_2$  — вторичное напряжение цепи;  $I$  — сварочный ток, протекающий во вторичной обмотке трансформаторов;  $\chi$  — коэффициент искажения, соответствующий отношению первой гармоники тока к действующему значению;  $\cos \varphi$  — сдвиг фаз между напряжением и первой гармоникой тока;  $\eta$  — к. п. д. сварочной машины.

Коэффициент искажения изменяется в больших пределах при сварке, поэтому при расчетах можно принять выражения  $\chi \cos \varphi / \eta = 0,8 \div 0,9$ .

В конечной стадии оплавления сварочный ток рассчитывается по формуле

$$I = \frac{qv_0 s \rho}{(0,8 - 0,9) U_2},$$

где  $q$  — энергия, расходуемая на оплавление единицы массы металла;  $v_0$  — скорость оплавления;  $s$  — площадь поперечного сечения свариваемого изделия;  $\rho$  — плотность нагреваемого изделия.

При определении тока по формуле (30) для начальной стадии оплавления вводится множитель 2,5—3. Это связано с повышенной теплоотдачей от элементарного контакта в глубь металла в начале процесса.

### УСТОЙЧИВОСТЬ ПРОЦЕССА ОПЛАВЛЕНИЯ

Для получения качественного сварного соединения желательно, чтобы процесс оплавления проходил непрерывно, т. е. устойчиво. Это обеспечивается при условии саморегулирования процесса. Силовая электрическая часть сварочной головки имеет понижающий трансформатор и вторичную цепь, соединяющую трансформатор с электродами. Вторичная цепь состоит из массивных медных жестких и гибких элементов, которые размещают так, чтобы сопротивление их переменному току было минимальным. Силовая электрическая цепь сварочной головки изображена на рис. 122, где  $X_{к.з}$  и  $R_{к.з}$  — реактивное и активное сопротивления короткого замыкания машины.

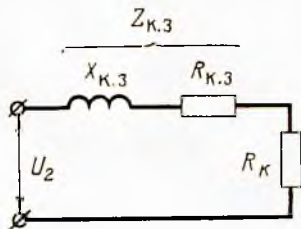


Рис. 122. ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА СВАРОЧНОЙ ЦЕПИ

Мощность, выделяемая в сварочном контакте:

$$P_{\kappa} = U_2 I \chi \cos \varphi - I^2 R_{\kappa.з}$$

Из этого выражения можно заметить, что при переходе оплавления к короткому замыканию ( $\chi = 1$ )  $P_{\kappa}$  достигнет максимальной величины. Принимая во внимание схему замещения, можно показать, что максимальному значению мощности  $P_{\kappa \max}$  соответствует равенство  $Z_{\kappa.з} = R_{\kappa}$  и

$$P_{\kappa \max} = \frac{U_2^2}{2Z_{\kappa.з}(1 + \cos \varphi_{\kappa.з})},$$

где  $\cos \varphi_{\kappa.з} = R_{\kappa.з}/Z_{\kappa.з}$ .

Рассмотрим процесс сварки, когда заданной скорости оплавления и определенному тепловому состоянию деталей соответствует мощность  $P_{\kappa 0}$  и соответствующая проводимость  $G_{\kappa 0} = 1/R_{\kappa}$  (рис. 123, а). Этому режиму оплавления соответствует точка, которая находится ниже кривой  $P_{\kappa} = f(G_{\kappa})$ . При изменении проводимости от средней  $G_{\kappa 0}$  на величину  $\Delta G_{\kappa}$  изменится и мощность

$$\Delta P = m \Delta G_{\kappa}, \quad (31)$$

где  $m$  — коэффициент пропорциональности

$$m = (\partial P_{\kappa} / \partial G_{\kappa})_{G_{\kappa} = G_{\kappa 0}}.$$

Изменение мощности приведет к ускорению или замедлению нагрева и разрушению элементарных контактов. С увеличением мощности повышается скорость разрушения контактов и проводимость при этом снижается. При некотором отклонении проводимости от среднего значения можно считать, что

$$d\Delta G_k/dt = -k\Delta P_k, \quad (32)$$

где  $k$  — коэффициент пропорциональности, зависящий от целого ряда факторов, таких, как рельеф оплавляемой поверхности, температура и т. д.

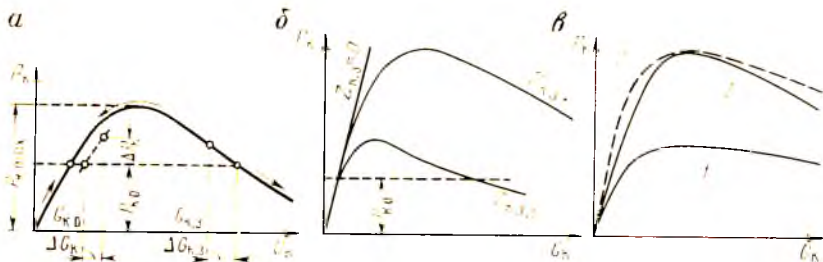


Рис. 123. ЗАВИСИМОСТЬ ПОЛЕЗНОЙ МОЩНОСТИ  $P_k$  ОТ ПРОВОДИМОСТИ СВАРОЧНОГО КОНТАКТА  $G_k$ :

$a$  — при устойчивом и неустойчивом оплавлении;  $б$  — при различных значениях  $Z_{k.3}$  ( $Z_{k.31} < Z_{k.32}$ ;  $U = \text{const}$ ;  $\cos \varphi_{k.3} = \text{const}$ );  $в$  — при различных значениях  $\cos \varphi_{k.3}$  (1 —  $\cos \varphi_{k.3} = 1$ ; 2 —  $\cos \varphi_{k.3} = 0$ ; 3 —  $\cos \varphi_{k.3} = 0$  при повышенном в 1,2 раз напряжении)

Из соотношений (31) и (32) можно установить, что

$$d\Delta G_k/dt = -km\Delta G_k, \quad (33)$$

откуда после интегрирования  $\Delta G_k = Ce^{-hmt}$ , где  $C$  — постоянная интегрирования.

Из выражения (33) можно заметить, что оплавление при определенной скорости подачи деталей может быть устойчивым, когда  $km > 0$ , но коэффициент  $k$  всегда положителен. Следовательно, процесс оплавления будет устойчив, когда  $m > 0$ , т. е. увеличению проводимости сварочного контакта соответствует повышение мощности. При оплавлении возможны резкие изменения проводимости сварочного контакта, поэтому при жестко заданной подаче не удастся вести процесс максимальной мощности  $P_{k \max}$ . Часто значение мощности  $P_k$  в 3—5 раз меньше  $P_{k \max}$ , и выражение полезной мощности с использованием проводимости  $G_k$  можно записать

$$P_k = \frac{U_2^2 G_k}{1 + (G_k Z_{k.3})^2 + 2R_{k.3} G_k}. \quad (34)$$

На основе выражения (34) можно построить график (рис. 123, б) для различных параметров цепи. Анализ графика показывает, что устойчивость процесса оплавления возрастает



по мере снижения сопротивления короткого замыкания и тем самым расширяется область допустимых колебаний проводимости сварочного контакта. На устойчивость процесса оплавления значительное влияние оказывает характер сопротивления короткого замыкания машины. Из рис. 123, в видно, что при одном и том же напряжении и сопротивлении короткого замыкания, но при различных  $\cos \varphi_{к.з}$  зависимости  $P_{к.з} = f(G_{к.з})$  существенно различаются. Это связано с тем, что активное сопротивление больше сказывается на устойчивости оплавления, чем индуктивное (рис. 124).

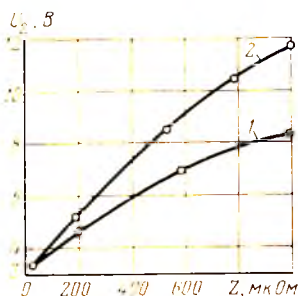


Рис. 124. ЗАВИСИМОСТЬ НЕОБХОДИМОГО МИНИМАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ ХОЛОСТОГО ХОДА СВАРОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА ОТ СОПРОТИВЛЕНИЯ КОРТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ЗНАЧЕНИЯХ ДОБАВОЧНОГО РЕАКТИВНОГО  $X$  (1) И АКТИВНОГО  $R$  (2) СОПРОТИВЛЕНИЯ

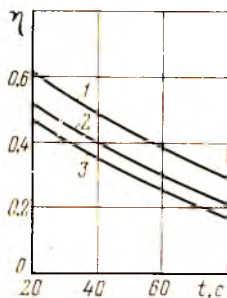


Рис. 125. ЗАВИСИМОСТЬ ТЕРМИЧЕСКОГО К. П. Д.  $\eta$  ОТ ДЛИТЕЛЬНОСТИ ОПЛАВЛЕНИЯ  $t$  ПРИ РАЗЛИЧНОМ НАПРЯЖЕНИИ ХОЛОСТОГО ХОДА СВАРОЧНОГО ТРАНСФОРМАТОРА: 1 — 6 В; 2 — 9 В; 3 — 12 В

Из приведенных формул для  $P_{к.о.}$  и  $P_{к.мак.}$  с учетом того, что  $P_{к.о.} = P_{к.мак.}/(3 \div 5)$ , определим напряжение  $U_2$ , при котором возможно устойчивое оплавление. Для начала оплавления

$$U_2 \approx \sqrt{24 q v_0 \rho s Z_{к.з} (1 + \cos \varphi_{к.з})},$$

а для завершения процесса

$$U_2 \approx \sqrt{8 q v_0 \rho s Z_{к.з} (1 + \cos \varphi_{к.з})}.$$

Процесс оплавления предназначен для нагрева изделий на соответствующую глубину и создания на свариваемых поверхностях пленки жидкого металла и окислов. Поэтому процесс оплавления тем совершеннее, чем больше тепла накапливается в нагреваемых изделиях и меньше выбрасывается в виде жидких перемычек.

Эффективным средством повышения термического к. п. д. оплавления считается создание машин с минимальным сварочным напряжением. На рис. 125 изображена зависимость, построенная по результатам калориметрических измерений для трех

напряжений холостого хода сварочного трансформатора. Снижение напряжения во вторичной обмотке трансформатора позволяет увеличить время существования элементарных контактов, что обеспечивает большую отдачу тепла от контакта в глубь изделия. Поэтому при разработке сварочных трансформаторов стремятся к снижению сопротивления короткого замыкания для обеспечения минимального напряжения во время процесса оплавления.

При оплавлении изделий кромки нагреваются и мощность, необходимая для оплавления, уменьшается. Для повышения к. п. д. оплавления желательно уменьшать напряжение в процессе нагрева металла, особенно когда оплавление идет на пределе устойчивости. В это время элементарные контакты существуют продолжительный период, но подобный процесс существования довольно сложно, так как случайное увеличение контактов может привести к короткому замыканию. Для этой цели используют специальные автоматические устройства, которые предусматривают нарушение устойчивости при случайных увеличениях проводимости сварочного контакта.

#### ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ЗАТРАТЫ ПРИ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ СВАРКЕ

Применение электроконтактной сварки оплавлением при строительстве магистральных трубопроводов стало возможно благодаря исследованию и разработке установок, которые потребляют меньше электроэнергии, чем стационарные. Энергетические затраты, которые характерны для этих установок при нагреве труб во время оплавления, можно представить в виде

$$P = v_0 F c_{1\rho} (T_m - T_0) + 2\lambda \frac{\partial T}{\partial x} F + \\ + v_0 F c_{2\rho} + v_0 F c_{3\rho_{ж}} (T_{ж} - T_m) + v_0 F c_{4\rho_{ж}} + P_d + P_T + P_M, \quad (35)$$

где  $P$  — мгновенная мощность, потребляемая при нагреве;  $v_0$  — скорость оплавления;  $F$  — площадь сечения нагреваемого изделия;  $c_1$  — средняя теплоемкость твердого металла;  $c_2$  — скрытая теплота плавления;  $c_3$  — средняя теплоемкость жидкого металла;  $c_4$  — скрытая теплота парообразования;  $\rho$  и  $\rho_{ж}$  — плотность твердого и жидкого металлов;  $T_m$  — температура плавления металла, равная  $1500^\circ\text{C}$ ;  $T_0$  — температура изделия;  $T_{ж}$  — температура расплавленного металла;  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности;  $\partial T/\partial x$  — градиент температуры в оплавляемых торцах;  $P_d$  — мощность, выделяемая по длине выступающих концов труба;  $P_T$  — мощность, теряемая в сварочном трансформаторе;  $P_M$  — мощность, теряемая с выбросом металла.

Рассматривая выражение (35), можно заметить, что первый член включает в себя мощность, которая идет на нагрев

металла до температуры плавления. В процессе нагрева температура изделия изменяется и требуемая мощность на нагрев уменьшается. Второй член рассматриваемого уравнения представляет мощность, которая используется на повышение теплосодержания изделия в процессе оплавления. Эта мощность повышается в процессе оплавления до момента достижения на нагреваемых торцах температуры плавления, а затем начинает снижаться. Следовательно, в первый момент при заданной скорости оплавления требуется значительная мощность для нагрева и поэтому процесс начинают с небольшой скорости оплавления, увеличивая ее к концу нагрева. Увеличение скорости оплавления по мере приближения осадки требуется для обеспечения устойчивого процесса оплавления и создания необходимого количества жидкого металла. Оплавление нагреваемых изделий осуще-

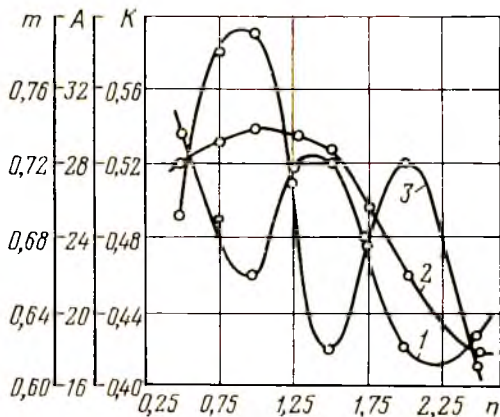


Рис. 126. ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТОВ  $A$  (1),  $m$  (2) и  $K$  (3) ОТ ПОКАЗАТЕЛЯ  $n$

ствляется с определенной закономерностью, которая выражается формулой

$$l_0 = gt^n, \quad (36)$$

где  $l_0$  — длина оплавления;  $g$  и  $n$  — любые положительные числа, которые характеризуют закономерность перемещения деталей.

С увеличением скорости оплавления и сечения свариваемого изделия повышается потребляемая мощность при любой закономерности перемещения изделий. Обычно для уравнения (36) принимают величину  $n$ , равную 1,25 и 1,5, что позволяет наиболее полно использовать мощность электростанции и рационально эксплуатировать сварочный трансформатор.

Активная мощность сварочного процесса может быть рассчитана с использованием средней скорости оплавления по формуле

$$P = Av_0^m F^K, \quad (37)$$

где  $P$  — средняя активная мощность, кВт;  $v_0$  — средняя скорость оплавления;  $F$  — сечение свариваемых изделий;  $A$ ,  $m$  и  $K$  — коэффициенты, зависящие от показателя  $n$  в уравнении (36), принимаются из графика (рис. 126).

Принимая во внимание формулу (37), можно определить расход электроэнергии за время оплавления:  $Q = A \tau_0^n F^k t$ . За время оплавления будет расплавлено металла  $M = v_0 F t \rho$ .

### НАГРЕВ И СОЕДИНЕНИЕ СВАРИВАЕМЫХ ИЗДЕЛИЙ

Для получения качественных соединений при электроконтактной сварке оплавлением необходимо перед осадкой обеспечить равномерный нагрев изделий по всей поверхности с образованием на оплавленных торцах пленки жидкого металла, которая способствует удалению окислов из стыка. В процессе нагрева изделий при стыковой электроконтактной сварке расчетную температуру рабочих участков можно определить, приняв схему нагрева неограниченного стержня равномерно распределенным по длине неизменяющимся током и приконтактным подвижным плоским источником. Температуру  $T(x, t)$  рабочих участков можно представить как сумму двух температур

$$T(x, t) = T_1(t) + T_2(x, t),$$

где  $T_1$  — распределение температуры в изделии от нагрева распределенным по объему металла источником;  $T_2$  — распределение температуры в изделии от нагрева подвижным плоским источником.

В этом случае уравнение, описывающее нагрев трубы распределенным по объему металла источником, имеет вид

$$dT_1/dt = j^2 \rho' / (c\rho), \quad (38)$$

где  $j$  — плотность тока в изделии;  $\rho'$  — удельное сопротивление металла;  $c$  — удельная теплоемкость металла;  $\rho$  — плотность металла.

Решая уравнение (38) при  $j = \text{const}$  и начальной температуре  $T_0 = 0$ , найдем

$$T_1(t) = \frac{1}{\alpha_{\rho c}} \exp \frac{\alpha_{\rho c} \rho_0'}{c_0 \rho} j^2 t - 1,$$

где  $\alpha_{\rho c}$  — общий температурный коэффициент;  $\rho_0'$  — начальное удельное сопротивление металла;  $c_0$  — начальная удельная теплоемкость металла.

Процесс распространения тепла в трубе при нагреве подвижным плоским источником выражается уравнением

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T_2}{\partial x^2} + \frac{1}{2} n g t^{n-1} \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (39)$$

где  $a$  — коэффициент температуропроводности;  $n$  и  $g$  — любые положительные числа, характеризующие закономерность перемещения деталей в процессе оплавления;  $t$  — время оплавления.

При решении уравнения (39) полагают, что тепло распространяется вдоль оси трубы  $Ox$  и теплоотдача с внутренней и наружной поверхностей отсутствует. Начало подвижной системы координат  $Ox$  связано с источником нагрева и совпадает с направлением его движения.

Экспериментальные исследования показали, что температура источника нагрева на оплавляемых торцах труб  $T_k(t)$  может быть выражена экспериментальной зависимостью

$$T_k(t) = T_m(1 - e^{-t/k}) + T_0,$$

где  $T_m$  — температура плавления нагреваемого металла;  $k$  — постоянная времени, зависящая от параметров процесса оплавления;  $T_0$  — начальная температура металла.

Для решения уравнения (39) принимают начальные и граничные условия

$$T_2(x, 0) = T_0; \quad T_2(0, t) = T_m(1 - e^{-t/k}) + T_0;$$

$$T_2(\infty, t) = T_0.$$

Решая уравнение (39) для случая  $n=1$ , находят

$$T_2(x, t) = T_0 + \frac{1}{2} T_m [\operatorname{erfc} \alpha + e^{vx/a} \operatorname{erfc} \beta - 2u(n, m)e^{-\alpha^2}], \quad (40)$$

$$\text{где } \alpha = \frac{x}{2\sqrt{at}} + \frac{v}{2a} \sqrt{at}; \quad \beta = \frac{x}{2\sqrt{at}} - \frac{v}{2a} \sqrt{at};$$

$$n = \sqrt{\left(\frac{1}{k} - \frac{v^2}{4a}\right)t}; \quad m = \frac{x}{2\sqrt{at}};$$

$v$  — скорость перемещения источника, равная половине скорости оплавления. Функцию  $u(n, m)$  находят по таблицам. Постоянная времени  $k$  при линейной скорости перемещения деталей в процессе сварки, когда  $n=1$ , выражается зависимостью

$$k = 3,3 \frac{L'}{R} e^{0,059 \frac{U_2^2}{LT_m^2}} \left( \frac{v_0}{\sqrt{af}} \right)^{0,0015 \frac{U_2^2}{LT_m^2} - 1,586}$$

где  $L'$  — индуктивность машины;  $R$  — активное сопротивление машины при коротком замыкании;  $U_2$  — вторичное напряжение сварочного трансформатора;  $L$  — коэффициент Лоренца;  $T_m$  — температура плавления металла;  $v_0$  — скорость оплавления;  $a$  — коэффициент температуропроводности;  $f$  — частота тока.

## ТРУБОВАРОЧНЫЕ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫЕ УСТАНОВКИ

Электроконтактная сварка непрерывным оплавлением впервые начала применяться на строительстве магистральных трубопроводов в 1952 г., когда ИЭС им. Е. О. Патона была создана установка КТСА-1 для сварки труб диаметром 200—500 мм с непрерывным наращиванием в «нитку». Дальнейшее усовершенствование технологической схемы сварки труб оплавлением привело к использованию двух вариантов сооруже-

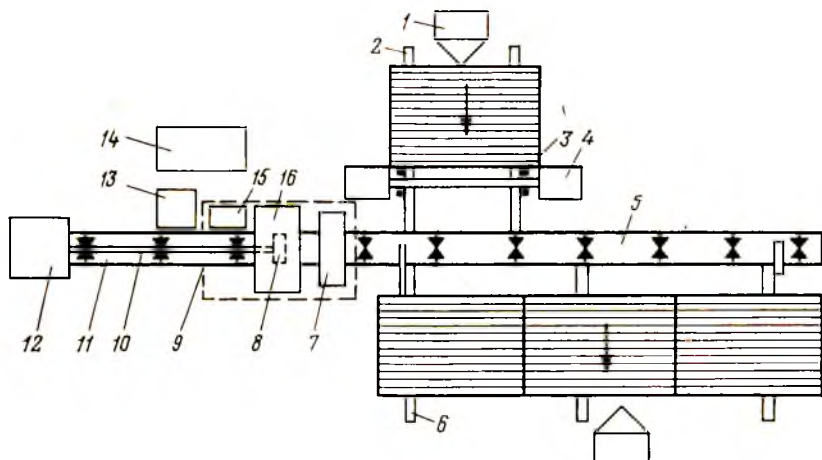


Рис. 127. СХЕМА ТРУБОВАРОЧНОЙ БАЗЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ КОНТАКТНЫХ УСТАНОВОК ТКУС

ния трубопроводов — базового и трассового. Применение электроконтактной сварки на полевой базе позволяет выполнять  $\frac{2}{3}$  объема сварочных работ с высокой производительностью и степенью механизации и только  $\frac{1}{3}$  работ — в менее благоприятных условиях на трассе.

### Базовый способ сварки

Базовый способ предусматривает сварку секций из нескольких труб с использованием всех основных преимуществ поточного производства. На базах применяют стационарные трубоплавильные контактные установки ТКУС, которые позволяют сваривать трубы различных диаметров (рис. 127). С помощью трубоукладчика 1 трубы укладывают на наклонный стеллаж 2 и поочередно подают отсекателем 3 к месту зачистки на поверхности труб контактной кольцевой полосы 4. После зачистки труба подается другим отсекателем 3 на рольганг 5, и с помощью транспортного устройства перемещается на короткий рольганг 11. При этом внутрь трубы входит штанга 10



с гратоснимателем 8, а конец трубы зажимается в сварочной головке 16. Сварочная головка соединена с гидropневмостанцией 13. Место сварки укрывают от осадков палаткой 9. Процессом сварки управляют с пульта 15. Вторая труба проходит зачистку, подается в зажимы сварочной головки, и проводится сварка с использованием передвижной электростанции 14. Далее удаляют внутренний грат в горячем состоянии при помощи гратоснимателя 8, который устанавливается над стыком механизма продольного хода 12. Затем секция из двух труб перемещается к механизму удаления наружного грата 7. Завершив процесс удаления грата, секция перемещается в конец приводного рольганга 5. Затем по рольгангу подается очередная труба, которая закрепляется в сварочной головке. Секция из двух труб также зажимается в сварочной головке, и выполняется сварка с последующим удалением грата. Полученная трехтрубная секция длиной 36 м поступает на стеллаж готовых секций 6.

Для сварки трубопроводов различных диаметров разработаны установки (табл. 18).

Таблица 18

ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫЕ СВАРОЧНЫЕ УСТАНОВКИ ТИПА ТКУС

| Тип установки | Тип сварочной головки | Диаметр свариваемых труб, мм | Мощность электростанции, кВт·А | Время сварки стыка, с |
|---------------|-----------------------|------------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| ТКУС-1        | СГ-1                  | 114—219                      | 125                            | 40—90                 |
|               | СГ-2                  | 273—377                      |                                |                       |
| ТКУС-2        | СГ-2                  | 273—377                      | 250                            | 60—90                 |
|               | СГ-3                  | 426—530                      |                                |                       |
| ТКУС-3        | СГ-4                  | 720—820                      | 500                            | 90—120                |
|               | СГ-5                  | 1020                         |                                |                       |
| ТКУС-4        | СГ-6                  | 1220—1420                    | 1000                           | 90—120                |

**Трассовый способ сварки**

Трассовый способ сварки оплавлением предусматривает непрерывное наращивание трубопровода из отдельных секций или труб. Для сварки труб диаметром 1220—1420 мм применяют передвижную электроконтактную установку «Север-1», которая перемещается от стыка к стыку. Процесс сварки неповоротных стыков включает следующие технологические операции: подготовку труб к сборке после раскладки их вдоль трассы (особенно тщательно проверяют периметр труб, следя за тем, чтобы расхождение было не более 12 мм), зачистку до металлического блеска внутренней полосы под контактные башмаки сварочного трансформатора, снятие усиления продольного шва трубы, сборку и центровку труб с помощью внутренней самоходной сварочной машины, установку защитного кожуха и электроконтактную сварку оплавлением (по окончании сварки автоматически включают внутренний гратосниматель).

тель и формируют обратный валик шва), разжим башмаков сварочной машины и передвижение ее к следующему стыку, удаление наружного грата, ультразвуковой контроль качества сварного соединения автоматической установкой. Производительность установки «Север-1» составляет 6—8 стыков в час и лимитируется в основном процессами сборки и центровки. Общая характеристика передвижных установок приводится в табл. 19.

Таблица 19

ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫЕ УСТАНОВКИ ТИПА ТКУП

| Тип установки       | Тип сварочной головки | Диаметр свариваемых труб, мм | Мощность электростанции, кВт·А | Время сварки стыка, с |
|---------------------|-----------------------|------------------------------|--------------------------------|-----------------------|
| ТКУП-532            | СГ-1                  | 114—219                      | 250                            | 40—90                 |
|                     | СГ-2                  | 273—377                      |                                |                       |
|                     | СГ-3                  | 426—529                      |                                |                       |
| ТКУП-4<br>«Север-1» | СГ-6                  | 1220—1420                    | 1000                           | 180—210               |
|                     | К-700                 | 1220—1420                    | 1000                           | 180—210               |

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПРОЦЕСС  
ЭЛЕКТРОКОНТАКТНОЙ СВАРКИ**

При трассовом способе сварки трубы, поставляемые к месту укладки, раскладывают на расстоянии 1,5—2 м от будущей бровки траншеи. Установка по мере сборки и сварки труб перемещается по трассе от стыка к стыку. Базовый способ сварки предусматривает выполнение операций по сборке и сварке на стеллажах, поэтому трубы подвозят непосредственно к стеллажу с последующей развозкой секций по трассе. Перед сборкой труб в обоих способах сварки предусматривается подготовка труб к сварке и их центровка. Подготовка труб к сварке заключается в их осмотре, удалении с концов снега, грязи и зачистке контактной кольцевой полосы. Центровка стыка проводится механической системой сварочной головки, которая действует как наружный центратор с возможным перемещением сцентрированных труб вдоль оси для процесса оплавления и осадки. Из-за того что могут быть отклонения размеров труб по диаметру, допускается смещение кромок свариваемых труб до 20 % толщины стенки трубы, но не более 2 мм.

Процесс электроконтактной сварки труб состоит из двух стадий: оплавления и осадки.

Оплавление предусматривает нагрев кромок свариваемых труб за счет прохождения тока в местах случайного контакта неровностей торцов труб. Процесс оплавления сопровождается выбросом брызг жидкого металла, искр и металлических паров. В процессе оплавления кромок трубы сближаются со скоростью, обеспечивающей подведение оптимальной мощности

в зоне разогрева. Среднюю скорость оплавления  $v_{\text{ср}}$  можно рассчитать по формуле  $v_{\text{ср}} = \sqrt[0,83]{p/14,7}$ , где  $p$  — удельная мощность оплавления. При этом минимальное время  $t$  процесса оплавления находят из выражения

$$t = 1,8 \cdot 10^{-11} e^{3,535 U_2} v_{\text{ср}}^{-0,745-0,904 U_2} + 10.$$

Длина оплавленного участка в процессе нагрева труб  $l_0 = v_{\text{ср}} t$ .

Осадка завершает сварочный процесс, и для повышения качества сварных соединений она проводится под током. Скорость сближения кромок в процессе осадки составляет не менее 20 мм/с при удельном давлении 40—50 МПа. При осадке создается пластическая деформация стенок труб, что вызывает их утолщение. Для малоуглеродистых сталей заметная деформация труб при удельном давлении 40 МПа наблюдается в зоне нагрева при температуре 1100—1150 °С.

Максимальное усиление толщины стенки трубы после осадки устанавливается из выражения

$$h_y = \delta/2 (e^{\epsilon_y} - 1),$$

где  $\delta$  — толщина стенки свариваемых труб;  $\epsilon_y$  — относительная деформация стенки трубы в радиальном направлении,  $\epsilon_y = A k' l_0$ ;  $A$  — коэффициент, зависящий от качества оплавливаемой поверхности;

$$A = 11,1 (2,62 \cdot 10^{-7} T_{\text{к}}^2 - 6,35 \cdot 10^{-4} T_{\text{к}} - 1,38 \cdot 10^{-1} \delta U_2 e^{-15,76 v_{\text{ср}}} + 1,25 \delta^{0,05} e^{-0,33 v_{\text{ср}}} - 8,8).$$

Ширина усиления сварного соединения

$$a = \sqrt[n]{\ln \frac{\epsilon_y}{0,048}} / \beta,$$

где  $n$  и  $\beta$  — коэффициенты, зависящие от технологических параметров сварки и теплофизических свойств свариваемых материалов:

$$n = 1,1 + 0,16 l_0; \quad \beta = 0,25 + 0,01 (k' l_0)^{-1,8}.$$

После осадки с внутренней и наружной поверхностей стыка удаляют грат.

Качество сварных соединений проверяют внешним осмотром по усилению шва, которое после удаления наружного графа не должно превышать 3 мм.

Механические свойства сварных соединений, выполненных электроконтактной сваркой, проверяют ультразвуковым контролем и вырезкой образцов из труб с механическим их испытанием.

Образцы после снятия усиления испытывают на загиб. Качество соединений считают удовлетворительным, если средний угол загиба образцов не менее  $70^\circ$ , а его минимальное значение — не менее  $40^\circ$ . При испытании на растяжение металл сварных соединений должен выдержать не меньше нормативного значения временного сопротивления разрыву металла труб.

## ОБОРУДОВАНИЕ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНЫХ УСТАНОВОК

### Сварочные головки

Стационарные и передвижные установки электроконтактной сварки имеют различное конструктивное оформление, но вместе с тем они содержат общий характерный агрегат — сва-

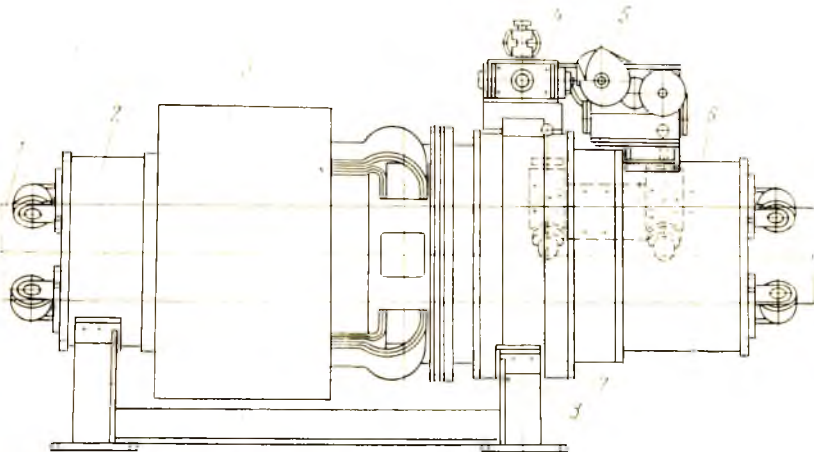


Рис. 128. СВАРОЧНАЯ ГОЛОВКА СГ-1

рочную головку. Сварочная головка выполняет зажим труб, центровку и удержание их в горизонтальном положении, осевое перемещение при оплавлении и осадку при сварке. Головка имеет сварочный трансформатор, который устанавливают непосредственно на корпусе или выносят отдельно. Сварочные головки СГ установок ТКУС унифицированы в большинстве узлов и деталей с соответствующими головками передвижных сварочных установок ТКУП. Сварочные головки СГ в зависимости от диаметра свариваемых труб подразделяются на наружные, внутренние и смешанные. Основные узлы наружных сварочных головок располагают с наружной стороны свариваемых труб. Такие головки применяют для сварки труб диаметром до 529 мм. К наружным сварочным головкам относятся СГ-1, СГ-2 и СГ-3. Наружная сварочная головка СГ-1 для установок ТКУС-1 и ТКУП-532 (рис. 128) состоит из двух ме-

ханизмов центровки левого 2 и правого 6, в которых зажимаются трубы 1. На левом корпусе механизма центровки установлен сварочный трансформатор 3, а на правом — редуктор механизма оплавления с программным кулачком 5 и следящее устройство 4. Правый механизм центровки расположен в одном корпусе с механизмом перемещения в процессе оплавления и осадки 7. Оба корпуса крепятся на опорной раме 8.

Сварочные головки снабжены устройствами для надежного захвата концов соединяемых труб. Поскольку трубопроводы сооружают из гладкостенных труб, то для предохранения их от проскальзывания зажимное устройство рассчитывают с учетом максимального осевого усилия  $Q = P/f$ , где  $Q$  — усилие зажатия труб в процессе осадки;  $P$  — усилие осадки;  $f$  — коэффициент трения зажимных кулачков по трубе,  $f = 0,25$ .

Необходимое усилие осадки для обеспечения качественного сварного соединения определяют из выражения

$$P = F \sqrt[6,99]{\frac{v_{\text{ср}} v_{\text{н}} (l_{\text{ос}}^{2,76} - l_{\text{н}}^{2,76})}{2,76 l^{2,76} (l_{\text{ос}} v_{\text{н}} - l_{\text{н}} v_{\text{ср}})}},$$

где  $F$  — площадь поперечного сечения свариваемых труб;  $v_{\text{ср}}$  — средняя скорость осадки,  $v_{\text{ср}} = 25$  мм/с;  $v_{\text{н}}$  — начальная скорость осадки, для сварки оплавлением  $v_{\text{н}} = 80$  мм/с;  $l_{\text{ос}}$  — полная осадка;  $l_{\text{н}}$  — начальная осадка, для сварки оплавлением  $l_{\text{н}} = 4$  мм;  $I$  — интегральная функция,  $I = (2/k')^{133-2,53} Ei$  ( $0,00635 T_{\text{к}}$ );  $Ei$  — функция, которая находится по таблице, в данном случае  $Ei = 1794,1$ .

Осадка при сварке оплавлением определяется из формулы

$$l_{\text{ос}} = \frac{2 (\ln T_{\text{к}} - \ln T_{\text{г}})}{k'},$$

где  $T_{\text{к}}$  — температура оплавленного торца трубы перед осадкой,  $T_{\text{к}} = 1520$  °С;  $T_{\text{г}}$  — температура зоны стыка,  $T_{\text{г}} = 1100$  °С, достигаемая на определенном расстоянии от торца;  $k'$  — градиент температурного поля

$$k' = \frac{\ln T_{\text{к}} - \ln T(x, t)}{x}.$$

Температуру  $T(x, t)$  определяют из уравнения (40).

Зажимное усилие передается на трубы с помощью кулачков, которые равномерно распределяются по периметру свариваемых труб. Для обеспечения совпадения осей центруемых труб кулачки сходятся одновременно к центру (или расходятся от центра при расположении головки внутри трубы). Подобное движение кулачков позволяет производить центровку

труб с отклонением размера по диаметру. Вместе с зажимными кулачками к трубам подводится ток от сварочного трансформатора через токоподводящие башмаки, которые равномерно распределяются по всей окружности. В процессе сварки трубы непрерывно сближаются со скоростью 0,1—1 мм/с. В начале оплавления скорость сближения минимальна, и в ходе процесса она изменяется, увеличиваясь перед осадкой до 1 мм/с. Регулирование скорости оплавления выполняет следящее устройство, которое по программе подает масло в гидроцилиндр головки, где перемещается поршень, приводящий в движение подвижную часть сварочной машины. Поступление масла в цилиндр регулируется золотником, в котором перемещается шток от кулачка. Движение кулачка осуществляется электродвигателем через редуктор. Обеспечив кулачку необходимый профиль, можно установить желаемую программу движения подвижной части машины в соответствии с законом оплавления.

Для сварки труб диаметром более 500 мм применяют сварочную головку, состоящую из двух отдельных агрегатов. Механизм центровки перемещения труб в процессе оплавления и осадки устанавливают внутри свариваемых труб, а сварочный трансформатор — снаружи. Такая конструкция характерна для головок СГ-4 и СГ-5, которые применяют на установке типа ТКУС-3.

### Сварочные трансформаторы

Сварочные трансформаторы установок ТКУС и ТКУП, предназначенные для электроконтактной сварки, отличаются от трансформаторов броневого типа обычных машин тем, что их располагают вокруг свариваемого изделия. Трансформаторы, установленные на обычных сварочных машинах, имеют сопротивление короткого замыкания 160—300 мкОм, а кольцевые трансформаторы установок ТКУС и ТКУП — от 10 до 50 мкОм. Кольцевые трансформаторы позволили резко сократить мощность сварочных установок по сравнению с мощностью в машинах обычных конструкций.

Трансформатор (рис. 129) имеет кольцевой сердечник 1, набранный из электротехнической листовой стали. Первичная обмотка 2 трансформатора равномерно распределена на сердечнике, вторичный виток 3 выполняет также функции кожуха, защищающего первичную обмотку от механических повреждений, брызг расплавленного металла и пр. Концы вторичного витка прикреплены к медным контактными токоподводящим башмакам 4, которые прижимаются к наружной поверхности концов труб, охватывая их равномерно по всему периметру. Сварочный ток проходит по вторичному витку и замыкается через металл труб и стык между ними. Первичная обмотка



сварочного трансформатора питается напряжением 220 и 380 В, на вторичной обмотке обычно бывает 6—8 В. Для обеспечения лучшего наблюдения за центровкой труб и удаления брызг из стыка, трансформатор обычно находится на некотором расстоянии от места сварки. Расстояние между контактными базмаками выбирают определенной величины, так как увеличение длины выступающих концов труб приводит к удлинению железной части вторичного контура, что способствует возрастанию электрических потерь трансформатора и ухудшает технико-экономические показатели его работы.

Более современным по конструкции является блочный трансформатор, который состоит из отдельных броневых трансформаторов, равномерно распределенных по обечайке, охватывающей свариваемую трубу. Каждый отдельный трансформатор блока выполнен из унифицированных деталей с заливкой обмоток эпоксидным компаундом. Первичные и вторичные обмотки соединены между собой параллельно через специальные замыкающие пластины. Масса блочного трансформатора несколько больше, чем кольцевого, но превосходит последний по технологичности изготовления, удобству в эксплуатации и надежности. Сопротивление короткого замыкания блочного трансформатора равнозначно кольцевому.

Мощность, потребляемая трансформатором при сварке:  $P_n = Fr$ , где  $F$  — площадь поперечного сечения свариваемой трубы;  $r$  — удельная мощность, расходуемая на сварку, для сварки оплавлением  $r = 0,6 \div 0,8$  кВт/см<sup>2</sup>. Ток в первичной обмотке  $I_1 = P_n / (U_1 \mu)$ , где  $U_1$  — напряжение в первичной обмотке;  $\mu$  — коэффициент мощности,  $\mu = 0,67$ . Ток во вторичной обмотке  $I_2 = I_1 k_T$ , где  $k_T$  — коэффициент трансформации,  $k_T = U_1 / U_2$ .

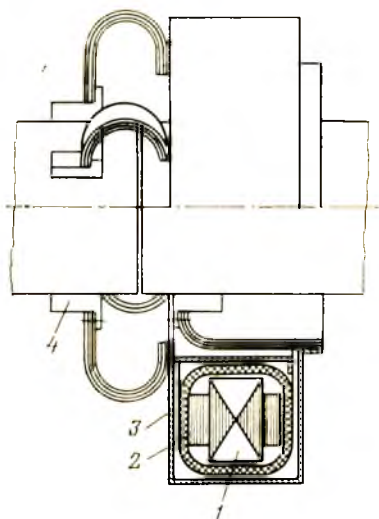


Рис. 129. КОЛЬЦЕВОЙ СВАРОЧНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР ДЛЯ СТЫКОВОЙ СВАРКИ ТРУБ

### Источники электропитания

Электрическое питание сварочных установок ТКУС и ТКУП осуществляется от передвижных дизель-электрических станций. Мощность дизель-электрической станции расходуется на питание сварочного трансформатора и электродвигателей,

приводящих в движение различные агрегаты установки, которые могут работать одновременно в процессе сварки.

Мощность сварочной установки  $W = P_{\text{ш}}/\eta + P_{\text{в}}$ , где  $P_{\text{в}}$  — мощность, расходуемая на привод вспомогательных механизмов, равная 20 % от всей потребляемой;  $\eta$  — коэффициент, учитывающий случайные перегрузки при сварке,  $\eta = 0,7$ .

Электрический генератор обладает жесткой вольт-амперной характеристикой и высокими динамическими свойствами, которые необходимы для обеспечения устойчивого процесса оплавления.

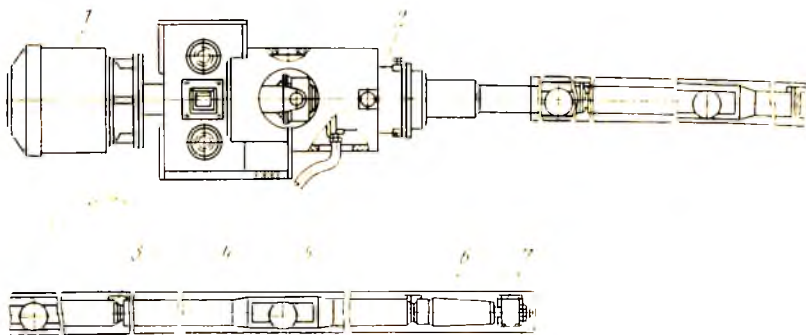


Рис. 130. ГРАТОСНИМАТЕЛЬ УСТАНОВКИ ТКУС-1

На стационарных установках источники электропитания состоят из дизельного двигателя и синхронного генератора. Кроме этого, на установке ТКУС-1 имеются топливные и масляные баки, аккумуляторы или баллоны со сжатым воздухом для пуска двигателя и подогреватель. Подогреватели обеспечивают запуск дизельного двигателя при температуре окружающего воздуха — до 50 °С. Оборудование электростанций установок ТКУС устанавливают на раму. Для установки «Север-1» используют передвижную электростанцию ЭСД-1000-Т.

## Гратосниматели

В заключительной стадии образования сварного соединения на внешней и внутренней поверхностях сварного соединения образуется выдавленный и охлажденный металл — грат, который должен быть удален из-за того, что он создает помехи при эксплуатации трубопроводов и затрудняет ведение изоляционных работ. Грат снимают в горячем состоянии при температуре шва 800—1400 °С и в холодном состоянии.

На установках типа ТКУС-1 применяют внутренний гратосниматель (рис. 130), который состоит из центрального устройства с бойками 7, брызгоулавливающего конуса 6, вала 3,

вращающейся штанги 4, опорных роликов 5, пневмоцилиндра 2 и электродвигателя 1. В процессе оплавления брызгоулавливающий конус находится под стыком и на него попадает основная часть брызг жидкого металла. После осадки при помощи пневмоцилиндра 2 штанга подает центробежный механизм в зону стыка. Центробежный механизм (рис. 131) имеет водило 1, на котором укреплены бойки 3, удерживаемые пружинами 2. При вращении вала бойки под действием центробежной силы прижимаются к поверхности грата и сбивают его.

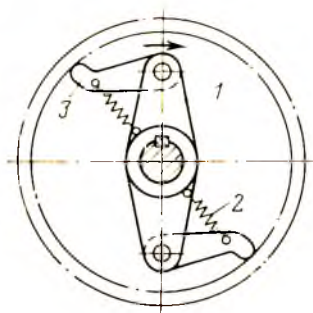


Рис. 131. ЦЕНТРОБЕЖНЫЙ МЕХАНИЗМ ВНУТРЕННЕГО ГРАТОСНИМАТЕЛЯ

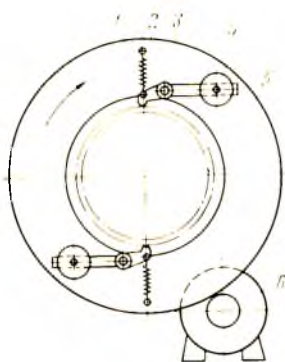


Рис. 132. СХЕМА НАРУЖНОГО ГРАТОСНИМАТЕЛЯ

Гратосниматели установки ТКУС-3 располагаются на конце штанги внутреннего механизма. Брызгоулавливатели изготовлены в виде щитков, которые устанавливают между зажимными кулачками манипуляторов. Для снятия внутреннего грата трубы перемещают с помощью рольганга.

Внутренние гратосниматели передвижных установок имеют электрический или пневматический привод, который располагается непосредственно внутри трубы. На установке «Север-1» гратосниматель выполнен в одном блоке со сварочной головкой К-700 и имеет электрический привод. После сварки гратосниматель подходит к стыку вместе со сварочной головкой и удаляет грат.

Наружный гратосниматель стационарных электроконтактных установок (рис. 132) состоит из полого ротора 5, электродвигателя с редуктором или клиноременной передачей 6, бойка 2, оси 3, противовеса 4 и пружины 1.

На стационарной установке гратосниматель работает следующим образом. После получения сварного соединения стык с температурой 800—1400 °С с помощью рольганга подают в наружный гратосниматель, который приводится во вращение. Бойки под действием центробежной силы, величину которой

можно регулировать противовесами, прижимаются к поверхности стыка, и за 30—45 с происходит удаление грата. Время установки стыка под бойками и удаление грата регулируется температурой стыка. Прекращение вращения ротора позволяет пружинам установить бойки в нерабочее положение, и сваренная секция удаляется из гратоснимателя.

При работе самоходной установки «Север-1» в полевых условиях наружный грат удаляют навесным агрегатом АНГ-141, имеющим шесть фрезерных головок. Каждая головка имеет электрический привод мощностью 2,2 кВт и удаляет грат с отдельного сектора. Агрегат подвешивают на стреле трубоукладчика ТО-12-24В.

### Зачистные устройства

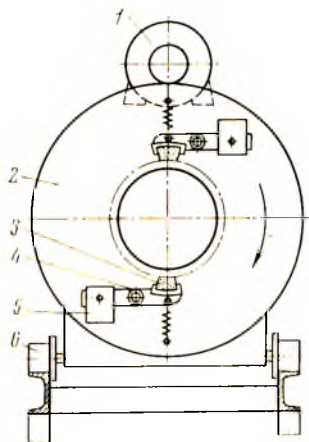


Рис. 133. СХЕМА ЗАЧИСТНОЙ МАШИНКИ

Для обеспечения надежного электрического контакта между поверхностью труб и токоподвижными башмаками требуется зачистка полосы до металлического блеска. На стационарных электроконтактных установках эту операцию проводят зачистными машинками (рис. 133). Эти машинки имеют ротор 2, рычаг 4 с абразивным инструментом 3, противовес 5, ролики 6 и электродвигатель с редуктором или клиноременной передачей 1. Зачистку контактных полос выполняют одновременно двумя машинками, которые устанавливают на расстоянии 100—200 мм от концов труб. Абра-

зивный инструмент под действием центробежной силы прижимается к поверхности трубы, и при вращении ротора происходит зачистка контактных полос шириной 60—80 мм.

На передвижной установке «Север-1» внутреннюю контактную полосу зачищают агрегатом АЗТ-141, который имеет четыре рабочих головки с иглофрезами диаметром 150 мм. Мощность привода иглофрезы составляет 2,2 кВт. Время зачистки полосы 80 с. Агрегат АЗТ-141 подвешивают на стреле трубоукладчика ТО-12-24В.

### Гидропневмостанции электроконтактных установок

Электроконтактные установки снабжены гидропневмостанциями, которые питают воздухом и маслом сварочные головки, механизмы стеллажей и внутренних гратоснимателей. Гидропневмостанции стационарных установок имеют масляный насос, емкость для масла, компрессор, гидропневмоаккумулятор,

воздушный ресивер и регулирующую аппаратуру. Все оборудование смонтировано в виде отдельного агрегата. Привод насоса и компрессора осуществляется электродвигателями. Гидропневмоаккумуляторы предназначены для накапливания масла под давлением в период оплавления и быстрой отдачи его в момент осадки для обеспечения скорости осадки 20 мм/с. Давление в гидросистеме сварочных установок достигает 12 МПа и регулируется с помощью предохранительных клапанов в зависимости от сечения свариваемых труб и типа установок. Пневмосистема электроконтактных установок работает при давлении до 0,7 МПа и имеет ресивер и осушитель. Для осушителей используют водостойники и силикагелевые патроны.

---

## *Глава 13*

### **СВАРКА ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ**

Магистральные трубопроводы, резервуары и другие конструкции в районах Крайнего Севера, тундры, болот, переувлажненных участков наиболее удобно сооружать зимой, когда мороз сковывает грунт и эти районы становятся проходимыми для транспорта и всей сварочно-монтажной техники. Зимние условия способствуют планомерному ведению работ. Производство монтажно-сварочных работ в зимнее время имеет свои объективные особенности, связанные с отрицательной температурой воздуха, наличием ветров и обильных снегопадов, которые оказывают существенное влияние на качество сварных конструкций. В зимних условиях стыки трубопроводов, резервуаров и других конструкций сваривают при температуре, как правило, не ниже  $-50 - 60^{\circ}\text{C}$ .

### **ВЛИЯНИЕ АТМОСФЕРНЫХ УСЛОВИЙ НА СВАРОЧНЫЙ ПРОЦЕСС**

Для обеспечения нормального технологического процесса сварки в зимних условиях необходимо учитывать особенности формирования швов при минусовой температуре, которые могут отрицательно влиять на структуру, механические свойства и сплошность сварных соединений. При сварке в зимнее время наблюдается увеличение скорости остывания металла сварочной ванны и околошовной зоны. С понижением температуры с  $+20$  до  $-50^{\circ}\text{C}$  длительность пребывания сварочной ванны в жидком состоянии уменьшается в среднем на 10 %, что оказывает влияние на всплытие неметаллических включений из ванны. В многослойных швах содержание шлаковых включений в зимнее время может повышаться (в декабре — феврале) до 54 % от общего числа выявленных дефектов, что связано

с более сложным удалением шлака со шва после выполнения каждого слоя, особенно при ручной сварке.

Влажность воздуха существенно отражается на свойствах металла шва. При автоматической сварке с полупринудительным формированием шва порошковой проволокой ПП-АН19 увеличение влажности от 30 до 100 % приводит к повышению общего содержания водорода в металле шва от 3,3 до 5,3 см<sup>3</sup>/100 г. Критическое содержание водорода, соответствующее появлению трещин в сварных соединениях, составляет 4,5 см<sup>3</sup>/100 г, поэтому выполнение автоматической сварки резервуарных конструкций при влажности воздуха более 80 % не допускается.

Характер изменения скорости охлаждения с понижением температуры при малых значениях критических скоростей охлаждения для некоторых сталей повышенной прочности показывает возможность получения структуры закалки в околосварной зоне сварного шва и закалочных трещин. При сварке сталей повышенной прочности содержание мартенсита в структуре металла зоны термического влияния обычно ограничивают до 30 %.

Основными факторами в получении требуемых структур и свойств металла околосварной зоны являются термический цикл сварки и его параметры: длительность нагрева и скорость охлаждения в интервале критических температур. Понижение начальной температуры приводит к снижению максимальных температур термического цикла в точках, одинаково удаленных от оси шва.

При охлаждении температурные кривые, соответствующие низкой начальной температуре металла, имеют более крутой спад, что указывает на повышение скорости охлаждения и уменьшение длительности пребывания металла при заданной температуре. Наиболее жесткий термический цикл (резкое остывание) получают при ручной сварке первого слоя шва трубопровода, особенно при использовании электродов с целлюлозным покрытием. Дальнейшее наложение второго и третьего слоев ручной сваркой и автоматической под слоем флюса с погонной энергией  $q_n = 18 \div 24$  кДж/см обеспечивает относительно большее тепловложение и термические циклы заметно меняются: скорость охлаждения резко падает, а длительность нагрева возрастает.

На основании теории распространения тепла в металле при дуговой сварке можно расчетным путем определить скорость охлаждения шва  $w$  в зависимости от погонной энергии  $q_n$ , температуры свариваемой стали или подогрева  $T_0$ , от теплофизических свойств стали и вида сварного соединения. При наплавке валика на полубесконечное тело (массивное изделие) скорость охлаждения

$$w = -2\pi\lambda(T_{\min} - T_0)^2/q_n,$$



где  $\lambda$  — коэффициент теплопроводности;  $T_{\min}$  — температура минимальной устойчивости аустенита. При наплавке валика на лист малой толщины  $\delta$  и при однопроводной сварке листов встык

$$w = -2\pi\lambda\sigma\frac{(T_{\min} - T_0)^3}{(q_n/\delta)^2} \quad (41)$$

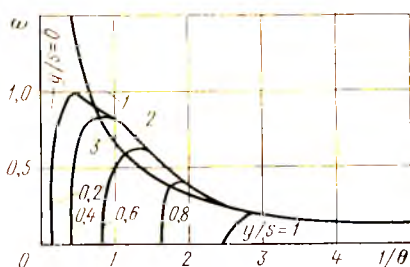


Рис. 134. ГРАФИК ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ МГНОВЕННОЙ СКОРОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ:

1 — полубесконечное тело; 2 — плоский слой; 3 — пластина

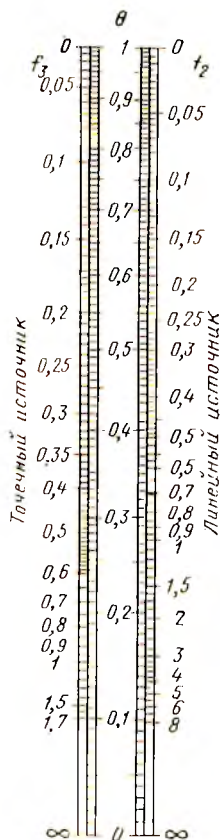


Рис. 135. НОМОГРАММА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОЭФФИЦИЕНТОВ  $f_2$  и  $f_4$

При наплавке валика на лист конечной толщины, а также при сварке отдельных слоев многослойного шва

$$w = -\omega 2\pi\lambda (T_{\min} - T_0)^2/q_n, \quad (42)$$

где  $\omega$  — безразмерный критерий процесса. Знак минус в приведенных уравнениях показывает, что происходит остывание металла. Безразмерный критерий  $\omega$  зависит от другого безразмерного критерия  $1/\theta$ :

$$\frac{1}{\theta} = \frac{2q_n}{\pi s^2 \sigma (T_{\min} - T_0)},$$

где  $s$  — толщина металла.

Для определения  $\omega$  построен график  $f(1/\theta)$ ;  $y/s$  характеризует относительную толщину слоя наплавленного металла при многослойной сварке (рис. 134).

При многослойной сварке стыковых и угловых швов расчетная скорость охлаждения при сварке первого слоя шва вычисляется по формуле (42). Для погонной энергии вводится поправочный коэффициент  $k_1$ , учитывающий разделку шва, и коэффициент приведения толщины  $k_2$ :

| Соединение . . . . . | Стыковое | Тавровое | Крестовое |
|----------------------|----------|----------|-----------|
| $k_1$ . . . . .      | 3/2      | 2/3      | 1/2       |
| $k_2$ . . . . .      | 3/2      | 1        | 1         |

При сварке первого слоя стыкового соединения

$$k_1 = k_2 = 180^\circ / (180^\circ - \alpha),$$

где  $\alpha$  — угол разделки кромок.

Для расчета скорости охлаждения при сварке первого слоя шва в формулы (41) и (42) подставляют не истинные значения погонной энергии  $q_n$  и толщины металла  $s$ , а приведенные  $q_{прив} = k_1 q_n$ ;  $s_{прив} = k_2 s$ .

При сварке закаливающихся сталей возникает необходимость расчета времени пребывания металла шва и различных участков зоны термического влияния выше температуры  $T$ . При наплавке валика на массивное изделие длительность нагрева выше температуры  $T$  вычисляется по формуле

$$t_n = f_3 \frac{q_n}{\lambda (T_{\max} - T_0)},$$

при однопроводной сварке со сквозным проплавлением листов толщиной  $s$

$$t_n = f_2 \frac{(q_n/s)^2}{\lambda_{cp} (T_{\max} - T_0)},$$

где  $f_2$  и  $f_3$  — коэффициенты, пропорциональные безразмерным длительностям нагрева, определяемые по номограмме (рис. 135) в зависимости от безразмерной температуры  $\theta$ :

$$\theta = (T - T_0) / (T_{\max} - T_0);$$

$T_{\max}$  — максимальная температура нагрева металла в рассматриваемой точке при наплавке валика на массивное тело

$$T_{\max} = \frac{2}{\pi e} \frac{q_n}{c \rho r^2} = 0,234 \frac{q_n}{c \rho r^2},$$

а при однопроводной сварке встык

$$T_{\max} = 0,484 \frac{q_n}{c \rho s 2y} \left( 1 - \frac{by^2}{2a} \right),$$

где  $r$  и  $y$  — расстояния от рассматриваемой точки до оси шва; см;  $b = 2\rho_1 / (c \rho s)$ ;  $a$  — коэффициент температуропроводности,  $a = \lambda / (c \rho)$ .

Двучлен в скобках учитывает интенсивность теплоотдачи с поверхности.

Сварка на режимах, при которых скорость охлаждения околошовной зоны выше верхнего предела, вызывает резкое снижение пластичности металла зоны термического влияния из-за ее закалки; режимы, приводящие к слишком малой скорости охлаждения, снижают пластичность и вязкость сварного соединения из-за чрезмерного роста зерна.

При сварке в зимних условиях многие углеродистые и низколегированные стали способны переходить в хрупкое состояние, что создает опасность разрушения конструкции в процессе ее изготовления или эксплуатации. Вероятность хрупкого разрушения тем больше, чем ниже температура окружающего воздуха. Для районов Крайнего Севера, где сооружаются резервуары, используют стали с низким порогом хладноломкости. Но даже при этом для стали классов С52/40 включительно при температуре ниже  $-25^{\circ}\text{C}$ , а для стали классов С60/45 при температуре ниже  $0^{\circ}\text{C}$  запрещаются ударные воздействия при изготовлении и монтаже, а также резка на ножницах и продавливание отверстий. Эти условия соблюдаются при сооружении магистральных трубопроводов и других конструкций.

Одной из особенностей сварки при отрицательной температуре является также возможность образования в швах горячих трещин. Это связано с тем, что в результате повышения скорости охлаждения возрастает и скорость упругопластической деформации в зоне температур, при которых нагретый металл может находиться в хрупком состоянии. Трещины могут образоваться под действием возникающих при этом усадочных напряжений. Скорость упругопластической деформации при охлаждении можно определить по формуле

$$\partial l / \partial t = \alpha(T) \partial T / \partial t,$$

где  $l$  — линейная деформация;  $\alpha(T)$  — коэффициент линейного расширения.

После подстановки значения  $dT/dt$  из выражения (42) получим

$$\frac{\partial l}{\partial t} = \frac{\alpha(T) \omega 2\pi\lambda (T_{\min} - T_0)^2}{q_n}.$$

На сварочный процесс существенное влияние оказывает ветер. Горение электрической дуги невозможно поддержать при скорости ветра 13 м/с. При скорости ветра 10 м/с прекращаются сварочные работы, так как исследования качества сварных швов при скорости ветра 2,5—9 м/с дали следующие результаты. При химическом анализе металла шва было установлено, что повышение скорости ветра приводит к снижению

содержания элементов, раскисляющих металл шва — марганца (от 0,48 до 0,27 %) и кремния (от 0,15 до 0,07 %), а также к повышению содержания азота (от 0,016 до 0,035 %). Эти приводит к понижению относительного удлинения наружных волокон шва при изгибе от 45 до 23 %, и в металле шва увеличивается число пор. Следовательно, по мере возрастания скорости ветра качество сварного шва ухудшается, что объясняется снижением защитного действия газовой фазы дуги при сварке открытой дугой. Приведенные данные показывают на необходимость защиты свариваемой поверхности и рабочего места сварщика ограждением от сильного ветра, сквозняков, дождя и снега. При температуре наружного воздуха —15 °С и ниже рекомендуется иметь вблизи рабочего места сварщика устройство для обогрева рук, а при температуре ниже —40 °С — теплое помещение. На монтажной площадке сварочные материалы (электроды, флюс, проволока) должны храниться раздельно по маркам и партиям в теплом и сухом помещении. Флюс следует хранить в закрытой таре. Для работы электроды и флюсы необходимо предварительно просушить и прокалить по режимам, указанным в технических условиях и паспортах, и хранить отдельно от непросушенных и непрокаленных. Просушенные и прокаленные флюс и электроды доставляют на место сварки в количестве, необходимом для работы в одну смену. Для сварки стали класса С60/45 электроды требуется подавать непосредственно из сушильной печи с температурой не ниже 45 °С и использовать в течение 2 ч. У рабочего места сварочные материалы хранят в условиях, исключающих увлажнение.

### **ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПРИ СВАРКЕ В ЗИМНИХ УСЛОВИЯХ**

При сварке в зимних условиях возникает необходимость применения дополнительных технологических мероприятий для нормального протекания процесса сварки. К технологическим мероприятиям, регулирующим скорость охлаждения сварного соединения, можно отнести: предварительный подогрев свариваемых изделий, повышение погонной энергии при сварке, сокращение времени технологических перерывов при наложении первого и последующих слоев шва, применение теплоизолирующего пояса.

При сварке магистральных трубопроводов и резервуаров определение необходимости предварительного подогрева и его температуры связано с обеспечением требуемого качества сварных соединений, но эта операция связана с повышением трудоемкости и издержек строительного производства, удлинением производственного цикла. Понижение скорости охлаждения при подогреве увеличивает время распада аустенита согласно термокинетической диаграмме. Это способствует пер-

литному превращению, влияя на мартенситное превращение при сварке закалывающихся трубных сталей. Для улучшения структуры при подогреве требуется понизить скорость охлаждения с учетом температурного интервала, способствующего превращению аустенита в мартенсит. Температуру подогрева при сварке сталей определяют по данным тепловых расчетов и по диаграммам распада аустенита.

Увеличение содержания в стали углерода и почти всех легирующих элементов повышает склонность стали к закалке. Влияние легирующих элементов на закалываемость стали с помощью коэффициентов может быть приведено к аналогичному влиянию углерода. Полученная величина носит название эквивалента углерода  $C_{eq}$  и служит удобной мерой для сравнительной оценки склонности стали к закалке. Чем больше эквивалент углерода, тем больше склонность стали к закалке и меньше должна быть фактическая скорость охлаждения при сварке, чтобы не образовалось закалочных структур.

Для ручной сварки и полуавтоматической дуговой сварки резервуарных конструкций из стали классов до C52/40 включительно разрешается выполнять работы без предварительного подогрева на повышенных режимах (табл. 20). При более низких температурах ручную и полуавтоматическую сварку следует выполнять с предварительным подогревом стыка до 120—160 °C на ширине 100 мм с каждой стороны соединения.

Таблица 20

МИНИМАЛЬНАЯ ТЕМПЕРАТУРА РЕЗЕРВУАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ  
ПРИ СВАРКЕ БЕЗ ПОДОГРЕВА (В °C)

| Толщина стали, мм    | Сталь углеродистая                    |                      | Сталь низколегированная<br>до класса С52/40<br>включительно |                      |
|----------------------|---------------------------------------|----------------------|-------------------------------------------------------------|----------------------|
|                      | Швы сварных соединений в конструкциях |                      |                                                             |                      |
|                      | решетчатых                            | листовых<br>объемных | решетчатых                                                  | листовых<br>объемных |
| До 16 (включительно) | —30                                   | —30                  | —20                                                         | —20                  |
| 16—30                | —30                                   | —20                  | —10                                                         | 0                    |
| 30—40                | —10                                   | —10                  | 0                                                           | +5                   |
| Свыше 40             | 0                                     | 0                    | +5                                                          | +10                  |

Автоматическую сварку резервуарных конструкций можно выполнять без подогрева при монтаже резервуаров: из углеродистой стали толщиной до 30 мм, если температура стали не ниже —30 °C, а при больших толщинах — не ниже —20 °C; из низколегированной стали толщиной до 30 мм, если температура не ниже —20 °C, а при больших толщинах — не ниже —10 °C. При более низких температурах воздуха для компен-

сации тепловых потерь автоматическую сварку выполняют на повышенных режимах, чтобы уменьшить скорость охлаждения сварного соединения за счет изменения погонной энергии и получить нормальный температурный режим для формирования сварного шва.

Необходимая эффективная тепловая мощность дуги при отрицательной температуре

$$q_{от} = q \sqrt{1 + 8\pi\lambda c\rho v k (T_{пл}/q)^2 (T_n - T_0)},$$

где  $q$  — эффективная тепловая мощность дуги при 20 °С;  $v$  — скорость сварки при 20 °С;  $k$  — коэффициент, равный 0,005;  $T_{пл}$  — температура плавления металла, принимаемая 1450 °С;  $T_n$  — нормальная температура воздуха, равная 20 °С;  $T_0$  — начальная температура изделия, равная температуре окружающей среды.

Скорость сварки при отрицательной температуре

$$v_{от} = \frac{1}{1/v + 8\pi\lambda c\rho k (T_{пл}/q)^2 (T_n - T_0)}.$$

При сварке в зимних условиях пребывание сварного шва при положительной температуре удается получить, накладывая шов короткими участками. Учитывая условия табл. 20, ручная и полуавтоматическая сварка резервуаров из стали толщиной более 20 мм должна проводиться следующими способами: каскадом, горкой, двусторонней сваркой секциями. Резервуары из стали класса С60/45 сваривают при температуре не ниже —15 °С при толщине стали до 16 мм и не ниже 0 °С при толщине стали от 16 до 25 мм. При более низких температурах сталь указанных толщин сваривают, предварительно подогревая до температуры 120—160 °С. Условия при сварке короткими участками выбирают такими, чтобы температура охлаждения первого слоя к моменту наложения второго слоя не падала ниже определенной температуры  $T_b$ . В этом случае длительность пребывания околошовной зоны  $t_b$  выше температуры  $T_b$  должна соответствовать условиям завершения распада аустенита. Температура  $T_b$  зависит от длины завариваемого участка  $l$ , погонной энергии сварки  $q/v$  и температуры  $T_0$ .

Температура  $T$  точек, расположенных на оси  $x$  (рис. 136), изменяется во времени

$$T - T_0 = \frac{q}{v\delta\sqrt{4\pi\lambda c\rho}}.$$

За время сварки одного слоя  $t_1$  на участке  $l$  температура понизится до  $T_b$ , тогда

$$t_1 = \frac{q^2}{4\pi\lambda c\rho\delta^2 v^2 (T_b - T_0)^2}. \quad (43)$$



Время  $t_1$  складывается из времени горения дуги  $t_r = l/v$  и времени перерывов  $t_n$ . Вводя коэффициент горения дуги  $k_r = t_r/t_1$ , находим

$$t_1 = l/(vk_r). \quad (44)$$

Подставляя выражение (43) в уравнение (44), находим длину завариваемого участка

$$l = 0,04 \frac{k_3^2 k_r q^2}{\delta^2 v (T_b - T_0)^2}. \quad (45)$$

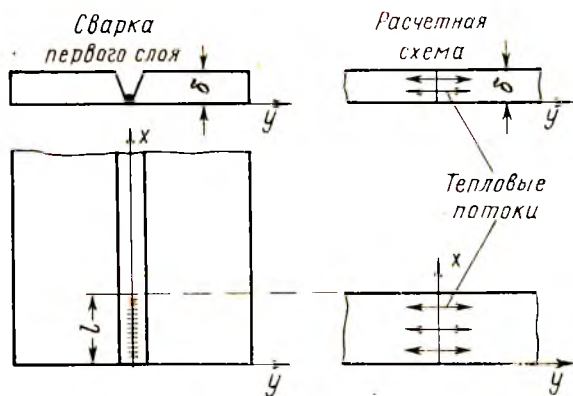


Рис. 136. СХЕМА К РАСЧЕТУ ТЕМПЕРАТУРЫ ПЕРВОГО СЛОЯ ПРИ СВАРКЕ КОРОТКИМИ УЧАСТКАМИ

Для ручной многослойной сварки коэффициент  $k_r = 0,6 \div 0,8$  и для автоматической многослойной сварки  $k_r = 1$ . Коэффициент  $k_3$  найден опытным путем и для соединения встык равен 1,5, для соединения втавр и внахлестку — 0,9; для крестового соединения — 0,8. Длина участка, найденная по формуле (45), дает возможность первому слою находиться при температуре выше  $T_b$  до момента сварки второго слоя шва.

При сварке резервуаров в зимнее время длину свариваемого участка определяют 90—100 мм, а при сооружении трубопроводов диаметром 1020—1420 мм каждый сварщик выполняет  $1/2—1/4$  стыка с применением электродов с основной обмазкой и  $1/4—1/5$  стыка с использованием электродов с целлюлозной обмазкой. В практике строительства резервуаров на одном стыке одновременно работают два сварщика, которые располагаются с одной стороны стенки.

В процессе охлаждения стыка во время сварки трубопроводов температура на свариваемых кромках не должна быть ниже значений, указанных в табл. 21.

При использовании предварительного подогрева технологический процесс сварки проектируется таким образом, чтобы время между окончанием подогрева и началом сварки корневого слоя было не более 10 мин. Для меньшей скорости ох-

**МИНИМАЛЬНАЯ ТЕМПЕРАТУРА МЕТАЛЛА КРОМКИ ТРУБЫ  
ПРИ СВАРКЕ (В °С)**

| Стали                                                                                                | Толщина металла, мм |         |         |       |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|---------|---------|-------|
|                                                                                                      | 19,5—25             | 15—17,5 | 10—14,5 | 7—9   |
| Низколегированные ( $\sigma_B = 500 \div 540$ МПа; $C_3 < 0,45$ %)                                   | 80—100              | 50—70   | 20—50   | 0—20  |
| Низколегированные дисперсионно-твердеющие ( $\sigma_B = 550 \div 600$ МПа; $C_3 = 0,45 \div 0,55$ %) | 130—150             | 80—100  | 50—80   | 20—50 |
| Термоупрочненные ( $\sigma_B \geq 600$ МПа; $C_3 = 0,45 \div 0,5$ %)                                 | 100—120             | 80—100  | 50—80   | 0—20  |

Примечание. Значение  $C_3$  вычислено по формуле МИС.

лаждения сварного соединения и поверхности листов и трубопроводов можно использовать теплоизолирующие пояса, которые изготовляют из асбеста или стеклоткани. В монтажных условиях наиболее целесообразны теплоизолирующие пояса, изготовленные из стекловолокна; они обладают минимальной чувствительностью к увлажнению. Теплоизолирующие пояса применяют для поддержания требуемой температуры подогрева перед началом наложения первого слоя в случае некоторой задержки сварочного процесса. Пояса можно использовать для сохранения тепла после автоматической сварки под флюсом при укрупнении листов в блоки, а труб в секции и после ручной сварки заполняющих слоев.

### **ПРИМЕНЕНИЕ СВАРОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ЗИМНЕЕ ВРЕМЯ**

Строительство и эксплуатация резервуаров и магистральных трубопроводов при отрицательных температурах предъявляет повышенные требования к качеству сварочных материалов. Ручную электродуговую сварку можно выполнять электродами различных марок (табл. 22), но при этом следует учитывать минимальную температуру эксплуатации резервуаров и трубопровода, так как наплавленный металл этих электродов может работать при определенной температуре.

В зимних условиях независимо от условий хранения электроды с целлюлозным покрытием перед сваркой просушивают при температуре 80—100 °С в течение 1 ч. Электроды с основным покрытием (ВСФС-50, УОНИ-13/55) прокаливают при температуре 300—350 °С, а электроды ВСФ-65, ВСФ-85 — при температуре 350—400 °С в течение 1 ч.

Электроды с основным покрытием при отрицательной температуре обладают удовлетворительными сварочно-технологическими свойствами, обеспечивая высокую пластичность, ударную вязкость и стойкость против трещинообразования сварных швов.

**ЭЛЕКТРОДЫ, ПРИМЕНЯЕМЫЕ ДЛЯ СВАРКИ ТРУБОПРОВОДОВ  
И РЕЗЕРВУАРОВ ПРИ ОТРИЦАТЕЛЬНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ**

| Марка      | Диаметр,<br>мм | Область применения                                                           | Применяемые конструкции<br>и минимальная температура<br>эксплуатации |
|------------|----------------|------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| ВСЦ-4      | 4              | Первый (корневой) слой шва для сталей с $\sigma_B$ до 550 МПа                | Подземные трубопроводы. —40 °С                                       |
| ВСЦ-4А     | 4              | Первый слой шва для сталей с $\sigma_B=550 \div 600$ МПа                     | То же                                                                |
| ВСЦ-Т      | 4              | Первый и второй слои шва для сталей с $\sigma_B$ до 600 МПа                  | »                                                                    |
| АНО-6      | 3; 4           | Первый и последующие слои шва для сталей с $\sigma_B$ до 500 МПа             | »                                                                    |
| МР-3       | 4; 5           | Первый и последующие слои шва для сталей с $\sigma_B$ до 480 МПа             | Наземные, надземные трубопроводы, резервуары. —40 °С                 |
| ВСФС-50    | 4              | Второй слой шва для сталей с $\sigma_B$ до 600 МПа                           | Подземные и надземные трубопроводы. —60 °С                           |
| УОНИ-13/45 | 3; 4           | Первый и последующие слои шва для сталей с $\sigma_B$ до 500 МПа             | Подземные, наземные, надземные трубопроводы, резервуары. —60 °С      |
| УОНИ-13/55 | 3; 4; 5        | Первый и последующие слои шва для сталей с $\sigma_B$ до 550 МПа             | То же                                                                |
| УОНИ-13/65 | 3; 4; 5        | Первый и последующие слои шва для сталей с $\sigma_B$ до 650 МПа             | Наземные, надземные, резервуары. —60 °С                              |
| ВСФ-60     | 4; 5           | Заполняющие и облицовочные слои шва для сталей с $\sigma_B=550 \div 600$ МПа | Подземные, наземные трубопроводы —60 °С                              |
| ВСФ-65     |                |                                                                              |                                                                      |
| ВСФ-75     | 4; 5           | Заполняющие и облицовочные слои шва для сталей с $\sigma_B$ до 700 МПа       | То же                                                                |
| ВСФ-85     |                |                                                                              |                                                                      |

**Примечание.** Электроды ВСФ-85 применяют только для сварки труб из термоупрочненных сталей.

При сварке электродами с целлюлозным покрытием, в отличие от предыдущих, имеется возможность получить меньше шлака, который легче удаляется с поверхности шва. Эти электроды позволяют обеспечить высокий темп сварочно-монтажных работ при поточно-расчлененном методе.

Для автоматической сварки трубопроводов и резервуаров в зимнее время часто применяют флюс АН-348А. Он обладает достаточно высокими сварочно-технологическими свойствами, обеспечивая требуемые механические свойства сварных соединений. Автоматическую сварку на полевых базах и монтажных площадках выполняют также под флюсом АН-22. Этот

флюс обладает повышенной чувствительностью к увлажнению на открытом воздухе, поэтому его перед употреблением необходимо прокалить. Флюсы применяют в сочетании с проволоками (табл. 23).

Таблица 23

СВАРОЧНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКИ  
ТРУБОПРОВОДОВ И РЕЗЕРВУАРОВ

| Марка флюса       | Марка проволоки              | Область применения                                                     | Применяемые конструкции и минимальная температура эксплуатации   |
|-------------------|------------------------------|------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| АН-348А<br>КВС-19 | Св-08ГА<br>Св-10ГА           | Заполняющие и облицовочный слои шва для сталей с $\sigma_v$ до 550 МПа | Подземные трубопроводы и наземные резервуары. —40 °С             |
| АН-60             | То же                        | То же                                                                  | То же, преимущественно для форсированных режимов                 |
| АН-22<br>АН-47    | Св-08ХМ<br>Св-08МХ           | Заполняющие и облицовочный слои шва для сталей с $\sigma_v$ до 600 МПа | Подземные, наземные и надземные трубопроводы, резервуары. —60 °С |
| ВСКФ-60           | Св-08А<br>Св-10ГА<br>Св-08ГА | Заполняющие и облицовочные слои шва для сталей с $\sigma_v$ до 550 МПа | Подземные трубопроводы. —60 °С                                   |
| АН-22<br>АН-47    | Св-08ХМ<br>Св-08ХМ           | Заполняющие и облицовочный слои шва для сталей с $\sigma_v = 600$ МПа  | Подземные, наземные и надземные трубопроводы. —60 °С             |

В зимнее время для автоматической сварки предпочтительно применять флюс АН-47, который обеспечивает качественную сварку труб большого диаметра с различными способами прокладки. Флюс АН-47, по сравнению с АН-22, обладает более высокими сварочно-технологическими свойствами по всем показателям, особенно по отделимости шлаковой корки с первого заполняющего слоя, кроме этого, он обладает незначительной жидкотекучестью и очень низкой склонностью к образованию пор. Механические свойства сварных соединений по ударной вязкости при сварке под флюсом АН-47 выше в сравнении с флюсом АН-22.

При понижении температуры в зимнее время объем сварочной ванны уменьшается для всех применяемых флюсов и электродов. Различные флюсы при одинаковом режиме сварки дают различные по объему сварочные ванны. Наибольшая ванна соответствует керамическому флюсу КВС-19 и наименьшая — флюсу АН-348А. Для сварочной ванны большего объема характерно более длительное пребывание в жидком состоянии, что способствует лучшему удалению газов и неметаллических включений и пр. При сварке трубопроводов зимой для всех флюсов и электродов характерно увеличение объема ванны на

15—20 % с использованием постоянного тока обратной полярности, поэтому сварку при отрицательной температуре следует вести на указанной полярности.

### СВАРОЧНО-МОНТАЖНЫЕ РАБОТЫ ПРИ СООРУЖЕНИИ ТРУБОПРОВОДОВ И РЕЗЕРВУАРОВ

Трубопроводные сварочно-монтажные работы при отрицательных температурах выполняют двумя способами:

предусматривают сварку труб в секции на трубосварочных базах с последующим соединением секций в «нитку» на трассе; проводят сварку отдельных труб в «нитку» непосредственно на трассе.

Первый способ имеет целый ряд преимуществ, так как на трубосварочных базах можно обеспечить временное сооружение для укрытия рабочих мест сборщиков и сварщиков. Трубы перед сборкой очищают от снега, льда и т. п. При осмотре на поверхности труб допускаются повреждения (риски, задиры на фасках) глубиной не более 5 мм, которые зашлифовывают машинками. Вмятины на торцах труб глубиной до 3,5 % диаметра при отрицательной температуре выправляют разжимными приспособлениями с подогревом 100—150 °С ( $\sigma_v$  до 539 МПа). Для сталей с пределом прочности  $\sigma_v$  более 539 МПа подогрев при выправлении вмятин проводят при любой температуре. Стыки труб собирают с применением внутренних центраторов. Наружные центраторы используют только для сборки захлестов, вставок или угольников. В процессе сборки обеспечивают предельно допустимые зазоры при температуре ниже —40 °С. Смещение кромок на участке длиной менее  $\frac{1}{4}$  периметра не должно превышать 20 % от толщины стенки трубы, но не более 3 мм. При сборке стыков с использованием наружных центраторов прихватки равномерно располагают по периметру стыка. Длина каждой прихватки составляет 100—200 мм, расстояние между ними — 300—600 мм. На стыке делают не менее четырех прихваток с толщиной шва более 4 мм.

Для сталей, которые не требуют подогрева перед сваркой, при выполнении прихваток и слоев шва в зимнее время повышают сварочный ток. При сварке закаливающихся сталей обеспечивают предварительный подогрев перед наложением прихваток и корневого слоя шва. Подогревающее устройство часто устанавливают по линии стыка и равномерно нагревают концы труб до температуры, определенной в соответствии с расчетом, на расстоянии не менее 150 мм от торцов. Температуру контролируют термокарандашами, термокрасками и различными приборами. После выполнения подогрева сваривают первый слой шва. Для сборки следующего стыка центратор снимают и перемещают только после полной сварки слоя шва.

Прихватки и слои шва очищают с помощью шлифовальных машинок, и только при температуре выше  $-30^{\circ}\text{C}$  разрешается использовать ударный пневмоинструмент.

Автоматическую сварку под слоем флюса для труб с толщиной стенки до 12,5 мм выполняют с наложением не менее чем в два слоя, с толщиной стенки 12,5—21 мм — в три-четыре слоя. При сварке закаливающихся сталей все поворотные стыки подвариваются изнутри по всему периметру автоматической сваркой под слоем флюса, а неповоротные осматривают и при необходимости стыки и дефектные места подваривают изнутри ручной сваркой нижней четверти периметра корневого слоя шва. Внутренний слой сваривают в течение 40 мин после выполнения сварки первого корневого слоя.

При обработке кромок листов резервуарных конструкций из углеродистой стали класса С38/23 ручной кислородной резкой процесс ведут таким образом, чтобы шероховатость поверхности не превышала 1 мм. Если резервуар сооружается или эксплуатируется в районах с расчетной температурой от  $-40$  до  $-65^{\circ}\text{C}$ , то необходимо обеспечить шероховатость поверхности при резке не более 0,5 мм.

Кислородная резка кромок листов из низколегированной стали классов до С60/45 при температуре ниже  $-15^{\circ}\text{C}$ , подлежащих в дальнейшем механической обработке, осуществляется с подогревом металла в зоне реза до  $100^{\circ}\text{C}$ . Листы перед сборкой очищают от снега, льда, ржавчины, влаги и т.п. При осмотре на поверхности кромок допускаются повреждения (риски, неровности, выхваты) глубиной не более 0,3 мм на длине 1 м. Повреждения поверхности кромок глубиной более 0,3 мм допускается исправить плавной зачисткой шлифовальными кругами. При сборке резервуаров листы соединяют на прихватках, которые размещают в местах расположения сварных швов. Размеры сечения прихваток стараются выполнить минимальными, чтобы обеспечить расплавление их при наложении швов проектного сечения. Для сталей классов до С52/40 прихватки делают длиной не менее 50 мм и расстояние между ними не более 500 мм, а для конструкций из стали класса С60/45 — соответственно 100 и 400 мм при катете шва прихватки не более половины катета шва сварного соединения.

Сварочный процесс осуществляют при стабильном режиме, установленном технологическим процессом, с допустимыми отклонениями тока и напряжения дуги  $\pm 5\%$ .

Каждый сварщик проставляет свой номер или знак на расстоянии не менее 4 см от границы шва. Если свариваемые листы применяют без консервации, то проплавленные поверхности и прилегающие к ним зоны металла шириной не менее 20 мм, а также кромки листов в местах примыкания выводных планок перед сборкой зачищают до металлического блеска с удалением влаги. При наличии на листах ржавчины, влаги



и т. п. непосредственно перед сваркой зачистку повторяют. Продукты очистки удаляют из зазора между собранными листами. Сварку листов стенки резервуара выполняют после проверки правильности их сборки. Каждый валик многослойного шва сваривается после очистки предыдущего валика, а также прихваток от шлака и брызг металла. Участки слоев шва с порами, раковинами и трещинами удаляют до наложения следующего слоя.

При двусторонней сварке стыковых швов, а также угловых и тавровых сварных соединений с разделанными кромками со сквозным проплавлением перед выполнением шва с обратной стороны очищают корень шва до чистого бездефектного металла. При вынужденном перерыве в процессе автоматической и полуавтоматической сварки работу возобновляют после очистки корневого участка шва длиной 50 мм и кратера от шлака. Данный участок и кратер полностью перекрывают швом. При температуре окружающего воздуха ниже  $-5^{\circ}\text{C}$  сварку резервуаров проводят от начала до конца без перерыва, за исключением времени, необходимого для смены электрода или электродной проволоки и зачистки шва в месте возобновления сварки.

В зимнее время запрещается прекращать сварку до выполнения шва проектного размера и оставлять незаваренными отдельные участки сварного соединения. При вынужденном прекращении процесса сварки работы возобновляют после подогрева листов в соответствии с технологическим процессом, разработанным для свариваемых конструкций.

Для резервуаров, сооружаемых и эксплуатируемых в районах с расчетной температурой ниже  $-40$  и до  $-65^{\circ}\text{C}$  включительно, вырубку дефектов швов и основного металла при температурах ниже указанных в табл. 22 выполняют после подогрева зоны сварного соединения до  $100-120^{\circ}\text{C}$ . После удаления дефектных мест повторную сварку осуществляют после подогрева этой зоны до  $180-200^{\circ}\text{C}$ .

---

## *Глава 14*

### **ВЕРТИКАЛЬНЫЕ РЕЗЕРВУАРЫ И ГАЗГОЛЬДЕРЫ**

#### **РУЛОННЫЙ МЕТОД ИЗГОТОВЛЕНИЯ РЕЗЕРВУАРОВ И ГАЗГОЛЬДЕРОВ**

В Советском Союзе с 1948 г. получил широкое распространение рулонный метод изготовления и монтажа вертикальных цилиндрических резервуаров и газгольдеров. Индустриальный метод был разработан и применен ИЭС им. Е. О. Патона. Для

изготовления резервуарных конструкций был создан целый ряд рулонизирующих установок, начиная с одноярусных, с применением односторонней автоматической сварки. Современные схемы рулонирования полотнищ предусматривают применение двухъярусных установок, которые используют листы стали толщиной до 18 мм. На этих установках применяют двустороннюю

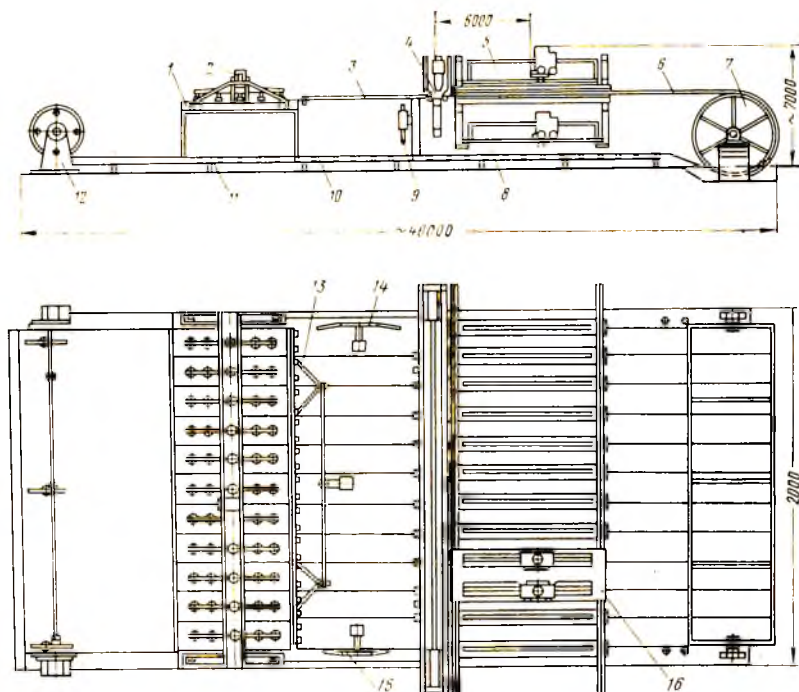


Рис. 137. СХЕМА УНИВЕРСАЛЬНОГО РУЛОНИРУЮЩЕГО СТАНА:

1 — контейнер; 2 — самоходная тележка с вакуумными захватами; 3 — место сборки секций; 4, 9 — места сварки поперечного шва; 5, 8 — места сварки продольных швов; 6 — место осмотра швов; 7 — направляющий барабан; 10 — место контроля и исправления дефектов сварки; 11 — грунтовка полотнища; 12 — сворачивающее устройство; 13 — задний толкатель; 14, 15 — боковые толкатели; 16 — катучая балка

сварку для изготовления полотнищ шириной 18 м, из которых монтируют резервуары и газгольдеры вместимостью до 50 000 м<sup>3</sup>. Для изготовления сварных рулонных заготовок используют рулонизирующий стан (рис. 137). Процесс рулонирования листовых конструкций состоит из заготовки элементов полотнищ, сборки, сварки, контроля качества сварки, исправления дефектов и сворачивания.

Заготовительные операции начинаются с очистки и правки листов. Металлургические заводы поставляют стальные листы с номинальными размерами 1500×6000 мм (или 2000×9000

мм) с обработкой четырех сторон или обрезкой торцов. После правки листов на листопрямильных вальцах их подвергают вторичной очистке и автоматическому контролю на выявление расслоений в металле и других дефектов. Листы, выдержавшие испытание, подают по рольгангу в контейнер, в котором их укладывают в пакет необходимой толщины (или массы). Пакеты устанавливают на рабочий стол стана, обеспечивающего обрезку всех четырех кромок. После обрезки кромок пакет подают на сортировочную площадку для комплектования. Чистовые размеры листовых заготовок принимают равными  $1490 \times 5980$  мм с допуском  $\pm 0,5$  мм по ширине,  $\pm 1,5$  мм по длине. Листы в заготовительном цехе укладывают в контейнеры, в каждый контейнер-пакет помещают листы одинаковой толщины и одной марки стали. Контейнеры устанавливают с помощью мостовых кранов на загрузочную площадку стана в последовательности, определяемой расположением листов в полотнище. К месту сборки на верхнем ярусе листы одной секции доставляют краном-раскладчиком.

*Сборка и сварка полотнищ.* Секцию полотнища собирают встык из листов с помощью толкателей, которые перемещают заготовки в продольном и поперечном направлениях, обеспечивая зазор между кромками 0—3 мм. Листы после выравнивания фиксируют в нужном положении на медной подкладке с помощью пневмоприжимов с усилием около 40 кН на 1 м стыка. Секцию, собранную из листов разной толщины, сваривают автоматической сваркой под слоем флюса. На универсальном стане используют двухдуговые аппараты А-1316, А-943 конструкции ИЭС им. Е. О. Патона.

Самоходный двухдуговой аппарат А-943 используют для сварки полотнищ из листов переменной толщины. Сварку ведут на постоянном токе с использованием проволоки диаметром 3—5 мм. Первая дуга образуется одним электродом и совершает колебательные движения поперек стыка, а вторая дуга — двумя расщепленными электродами поперек стыка. Скорость подачи электродной проволоки в аппарате регулируют с помощью сменных шестерен в пределах 60—400 м/ч. Направление электродов по стыку во время сварки корректируют по светомуказателю кнопочным устройством. В аппарате А-943 перемещение по стыку осуществляется электродвигателем постоянного тока, который обеспечивает плавную регулировку скорости сварки от 60 до 360 м/ч. В конце сварки предусматривается заварка кратера на пониженной скорости.

Порядок наложения швов на универсальном стане следующий: вначале на верхнем ярусе сваривают поперечные швы полотнища, т. е. будущие вертикальные швы резервуара, а затем продольные (после перемещения приваренной секции сваривающим устройством). Сварку поперечных стыков ведут в направлении от более толстых листов к тонким (рис. 138).

При уменьшении толщины листов режим сварки изменяется за счет отключения одной из дуг, обеспечивая непрерывное перемещение аппарата по всей длине стыка. Во время выполнения поперечного шва на предыдущих участках полотна сваривают продольные стыки. Два смежных стыка можно сва-

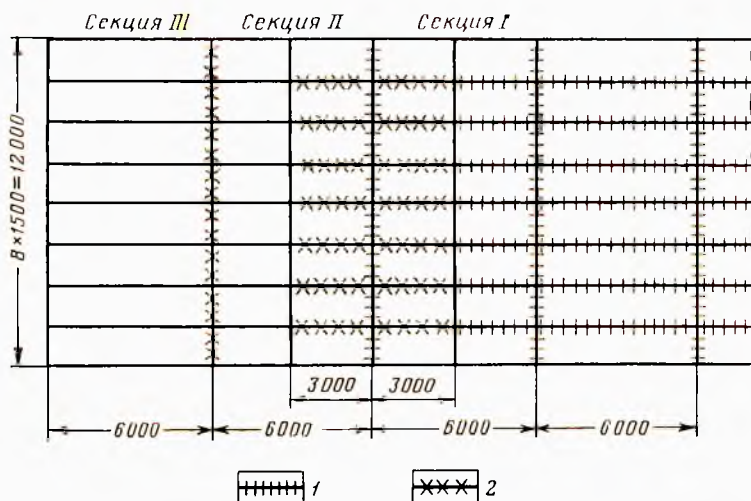


Рис. 138. СХЕМА СВАРКИ ШВОВ НА РУЛОНИРУЮЩЕЙ УСТАНОВКЕ:

1 — ранее сваренные стыки; 2 — свариваемые стыки

ривать одновременно в одном направлении либо в противоположных: сварку начинают от середины одной секции и ведут через ранее выполненный поперечный шов до середины пред-

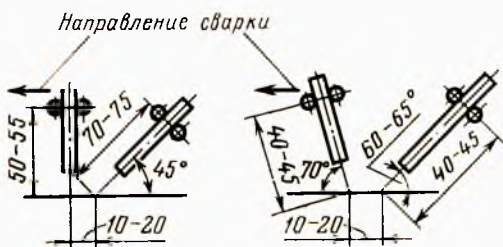


Рис. 139. ПОРЯДОК РАСПОЛОЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОДОВ ПРИ ДВУХДУГОВОЙ СВАРКЕ

шествующей секции. На нижнем ярусе сварку ведут в обратной последовательности: сначала выполняют продольные швы, а затем поперечные, что способствует улучшению качества сварных швов и уменьшает угловые деформации поперечного стыка.

Для расчета режимов двухдуговой сварки рассмотрим один из приближенных методов. В этом случае принимается одна из схем расположения электродов (рис. 139). Глубина проплавления основного металла при двусторонней сварке  $h = \sqrt[3]{\delta}$ , где  $\delta$  — толщина свариваемого металла. Скорость сварки в зависимости от толщины листов выбирают по графику (рис. 140), который составлен на основании характерных данных для сварки под флюсом. При заданной глубине проплавления ос-

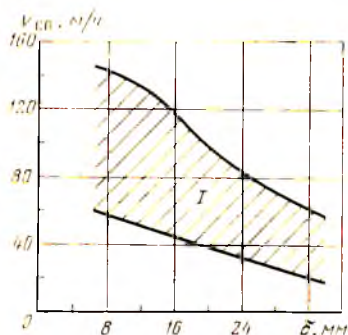


Рис. 140. ЗАВИСИМОСТЬ СКОРОСТИ СВАРКИ  $v_{св}$  ОТ ТОЛЩИНЫ ЛИСТОВ  $\delta$ :

$I$  — область устойчивого горения дуг

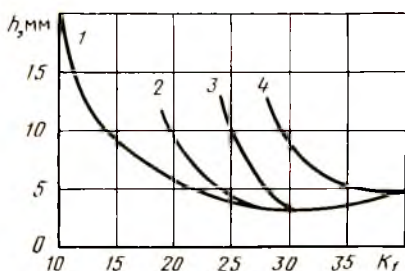


Рис. 141. ЗАВИСИМОСТЬ КОЭФФИЦИЕНТА ПРОПОРЦИОНАЛЬНОСТИ  $K_1$  В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ГЛУБИНЫ ПРОВАРА  $h$  И ДИАМЕТРА  $d$  ЭЛЕКТРОДНОЙ ПРОВОЛОКИ:

1 —  $d=5$  мм; 2 — 4 мм; 3 — 3 мм; 4 — 2 мм

новного металла и установленной скорости сварки сварочный ток проплавляющей дуги

$$I_1 = hK_1d + K_2(v_{св} - 25),$$

где  $K_1$  — коэффициент пропорциональности (рис. 141);  $d$  — диаметр электродной проволоки;  $K_2$  — коэффициент, учитывающий влияние скорости сварки,  $K_2 = 5 \div 8$ . Сварочный ток формирующей дуги  $I_2$  принимают равным  $(0,8 \div 1)I_1$ . Напряжение сварочной дуги при автоматической сварке под флюсом  $U = 22 + \beta I$ , где  $\beta$  — коэффициент, который для проволоки диаметром 2 мм принимается равным 0,025, более 2 мм — 0,02. Ширина шва  $B = \psi_{пр}h$ , где  $\psi_{пр}$  — коэффициент провара.

Для двухдуговой сварки

$$\psi_{пр} = \varphi \frac{d_1 U_1 + d_2 U_2}{I_1 + I_2},$$

где  $\varphi$  — коэффициент, зависящий от диаметра электродной проволоки,  $\varphi = 15$ ;  $d_1$  и  $d_2$  — диаметры электродных проволок первой и второй дуги;  $U_1$  и  $U_2$  — напряжения первой и второй дуги.

## Площадь наплавленного металла

$$F_{\text{н}} = \frac{\alpha_{\text{р}} \Sigma l}{3600 \rho v_{\text{св}}},$$

где  $\alpha_{\text{р}}$  — коэффициент расплавления присадочного материала;  
 $\rho$  — плотность металла;  $v_{\text{св}}$  — скорость сварки.

Фактическое усиление шва

$$C = \frac{F_{\text{н}} - Hb}{0,73B - b},$$

где  $H$  — общая высота шва;  $B$  — ширина шва;  $b$  — зазор.

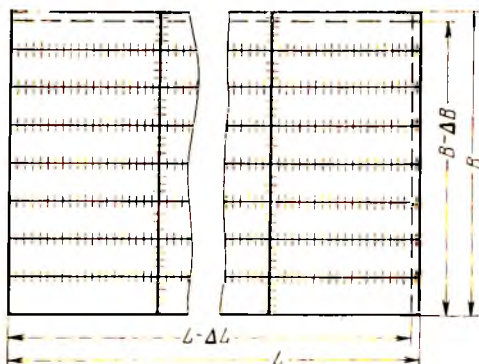


Рис. 142. СХЕМА ИЗМЕНЕНИЯ РАЗМЕРОВ СВАРНЫХ ПОЛОТНИЩ ПО ДЛИНЕ И ШИРИНЕ

На рулонизирующих установках стыки сваривают на постоянном токе. На универсальном стенде применяют шесть сварочных аппаратов. На каждом ярусе два аппарата сваривают продольные стыки и один — поперечные. На обычных рулонизирующих стендах скорость сварки достигает 30—50 м/ч, а на специализированном стенде листы толщиной 5—8 мм свариваются со скоростью до 120 м/ч и толщиной 14 мм — до 100 м/ч.

После сварки всех стыков полотнище освобождают от прижимов и с помощью сворачивающего устройства его перемещают на длину секции. Во время сварки контролируют сварные соединения (геометрические размеры шва и глубину проплавления) и исправляют дефекты. Кроме этого, определяют плотность швов вакуумным методом или керосиновой пробой.

При изготовлении сварных полотнищ возникают усадочные напряжения и деформации, которые вызывают изменения формы листовых конструкций. Линейные деформации полотнищ приводят к сокращению размеров полотнищ по ширине и длине из-за усадки сварных швов. Расчетное определение продольного и поперечного укорочения полотнища представляет важную задачу, так как дает возможность назначить соответствующие припуски и обеспечить необходимые размеры готового изделия. Общие продольные и поперечные деформации полотнища определяют, суммируя укорочения отдельных швов (рис. 142).



Укорочение полотнища в продольном направлении определяют по формуле

$$\Delta L = 1/B\delta \left( \sum_{i=1}^n \Delta V_{xi} + \sum_{j=1}^m \Delta V_{yj} \right),$$

где  $\Delta L$  — продольное укорочение полотнища;  $B$  — ширина полотнища;  $\delta$  — толщина листа;  $\Delta V_{xi}$  — объем продольного укорочения сварного горизонтального шва;  $\Delta V_{yj}$  — объем поперечного укорочения вертикального шва;  $n$ ,  $m$  — число соответственно горизонтальных и вертикальных стыков.

Объем продольного укорочения сварных соединений горизонтальных швов (от первого и второго проходов)

$$\sum_{i=1}^n \Delta V_{xi} = n\mu_x \frac{\alpha}{c\rho} q'_n l_{ш. г},$$

где  $\mu_x$  — коэффициент продольного укорочения сварного соединения;  $\alpha$  — коэффициент линейного теплового расширения;  $c\rho$  — объемная теплоемкость;  $q'_n$  — погонная энергия нагрева от второго прохода;  $l_{ш. г}$  — ширина горизонтального шва.

Погонная энергия при нагреве электрической дугой

$$q_n = \frac{q}{v_{св}} = \frac{IU}{v_{св}} \eta_n,$$

где  $v_{св}$  — скорость сварки;  $I$  — сварочный ток;  $U$  — напряжение дуги;  $\eta_n$  — эффективный к. п. д. процесса нагрева изделия дугой.

Объем поперечного укорочения сварных соединений вертикальных швов (от первого и второго проходов)

$$\sum_{j=1}^m \Delta V_{yj} = m\mu_y \frac{\alpha}{c\rho} (q_n + q'_n) l_{ш. в},$$

где  $\mu_y$  — коэффициент поперечного укорочения сварного соединения;  $m$  — число вертикальных стыков в полотнище;  $l_{ш. в}$  — длина вертикального шва.

Укорочение полотнища в поперечном направлении

$$\Delta B = \frac{1}{L\delta} \left( \sum_{j=1}^m \Delta V_{xj} + \sum_{i=1}^n \Delta V_{yi} \right),$$

где  $\Delta V_{xj}$  — объем продольного укорочения вертикального шва;  $\Delta V_{yi}$  — объем поперечного укорочения горизонтального шва:

$$\sum_{j=1}^m \Delta V_{xj} = m\mu_x \frac{\alpha}{c\rho} q'_n l_{ш. в};$$

$$\sum_{i=1}^n \Delta V_{yi} = n\mu_y \frac{\alpha}{c\rho} (q_n + q'_n) l_{ш. г}.$$

*Коробление полотнищ* наблюдается при сварке тонких листов (толщиной менее 6 мм). Это связано с действием вдоль сварных швов растягивающих остаточных напряжений, которые уравновешиваются сжимающими напряжениями, действующими в остальной части листов. Коробление тонких листов уменьшают закреплением листов во время сварки пневматическими прижимами и снижением погонной энергии сварочной дуги. Для уменьшения коробления листовых полотнищ большой протяженности рекомендуется сваривать вначале короткие поперечные швы, а затем продольные, причем те и другие швы целесообразно сваривать в направлении от середины полотнища к его краям.

*Поперечный сдвиг соединяемых листов* происходит в процессе сварки первого слоя шва. В результате неравномерного распределения тепла по длине стыка кромки свободно уложенных листов могут сдвигаться и раздвигаться. Усилия, развиваемые прижимающими приспособлениями, часто оказываются недостаточными для того, чтобы воспрепятствовать поперечному сдвигу листов. Для предотвращения сдвига листов принято кромки соединять сварочными прихватками, которые накладывают в конце свариваемого стыка.

## **МОНТАЖ И СВАРКА РЕЗЕРВУАРОВ ИЗ РУЛОННЫХ ЗАГОТОВОК**

На монтажную площадку рулонные заготовки и комплектующие детали поставляют в следующем виде: днище и плавающая крыша резервуара поступают в рулонах, а окрайки при толщине 8 мм и более доставляют в виде отдельных элементов с приваренными к ним подкладками; стенка резервуара также поступает в виде рулонов; кольцо жесткости и обвязочный уголок — отдельными транспортными элементами; коробка понтона плавающей крыши — отдельными элементами, подготовленными для сборки и сварки, а также отдельными щитами покрытия с центральной стойкой.

### **Монтаж днища**

К монтажу днища приступают после приемки основания и фундамента и разметки на нем рисок, определяющих проектное положение окрайков. Сборка днища начинается с укладки листов-окрайков по периферии основания. Окрайки собирают встык на остающейся металлической подкладке с зазором, который изменяется по длине стыка от 4 мм с наружной стороны резервуара до 10—12 мм внутри резервуара. Это необходимо для перемещения окрайков в процессе сварки стенки с днищем и предотвращения закрытия зазора от усадки. После проверки правильности собранного кольца окрайки сва-

ривают вручную или полуавтоматами на длине 200 мм. Сварку выполняют три-четыре сварщика, которые располагаются по окружности кольца на равном расстоянии друг от друга для обеспечения минимальных деформаций кольца от сварки.

На собранном и частично заваренном сегментном кольце размечают риску, определяющую расположение внутренней стороны стенки резервуара. При этом учитывают, что после сварки стенки с окрайками и сварки стыков окрайков между собой, приварки полотнища днища к окрайкам происходит уменьшение радиуса (для резервуаров вместимостью более 20 тыс. м<sup>3</sup>) в среднем на 20 мм, поэтому проектный радиус

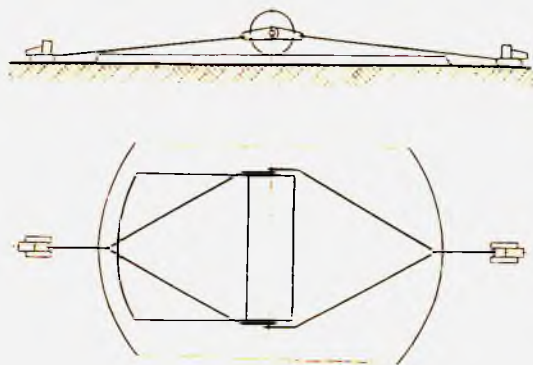


Рис. 143. СХЕМА РАЗВОРАЧИВАНИЯ РУЛОНОВ ДНИЩА

следует увеличить на это значение. На сегментном кольце размечают риску, определяющую расположение сборочных шайб. После разметки окрайков, основания и главных осей резервуара на основание накатывают рулоны днища по отсыпанному пандусу. Рулоны на днище накатывают и перемещают двумя тракторами с помощью траверс (рис. 143).

Полотнища отдельных элементов днища, начиная со средних, разворачивают на основании резервуара в положениях, близких к проектным.

Для правильного расположения полотнищ днища один относительно другого на первом развернутом элементе параллельно прямолинейной кромке наносят две риски: первую на расстоянии нахлестки 40 мм, вторую (контрольную) — на 15 мм дальше первой. При разворачивании следующего полотнища следят за тем, чтобы его кромка располагалась по первой риске. Полотнища после раскатки имеют остаточные деформации в виде «хлопунов», которые по СНиПу допускаются высотой не более 150 мм на площади 2 м<sup>2</sup>. Для выравнивания днища используют механизированные дорожные катки, которые через доски прижимают листы. После выравнивания

рулонных заготовок, проверки правильности положения полотнищ и замера нахлестки между полотнищами соединяют два крайних нахлесточных полотнища с помощью прихваток длиной 40 мм и расстоянием между ними 200 мм. Далее проводят сварку от середины днища к краям обратноступенчатым способом. Остальные три нахлесточных соединения днища закрепляют прихватками длиной 40 мм через каждые 500 мм, исключая соединение краев днища на длине 2 м и его середины на длине 1,5 м. Эти работы выполняют во время сварки днища с окрайками. Собранные соединения сваривают вручную электродами с основным покрытием (УОНИ-13/55) полуавтоматической сваркой под флюсом полуавтоматом ПШ-54 или порошковой проволокой. Сварку ведут три-четыре сварщика. Контроль качества швов осуществляют вакуумным методом.

На смонтированном днище размечают центр и риски для монтажа стенки корпуса и покрытия, а также оси вертикальных монтажных стыков. По риске, соответствующей наружной поверхности стенки резервуара, приваривают ограничительные коротышки из отрезков уголка. В резервуарах с понтоном или плавающей крышей на днище размечают положения коробов понтонного кольца и места расположения стоек понтона. На последние затем приваривают опорные плиты под стойки. Монтаж и сварку центральной части понтона или плавающей крыши ведут аналогично монтажу днища. На ней также размечают места расположения стоек и затем прорезают в этих местах отверстия для патрубков стоек. После завершения сварочных работ на днище швы контролируют вакуумным методом.

### **Монтаж корпуса, центральной стойки и щитов покрытия**

Монтаж стенки корпуса резервуара начинают с закатывания рулонов на днище, располагая их так, чтобы их нижние торцы находились вблизи от оси будущего монтажного стыка. Рулоны поднимают с помощью трактора (тракторной лебедки) и А-образной стрелы или краном. Рассмотрим второй способ как более современный. Перед подъемом рулона нижний торец укладывают краном в ложе закрепленного на днища шарнира. Под верхний торец рулона устанавливают клеть из шпал, обеспечивая горизонтальность рулона. Рулон закрепляют в шарнире и его торец сваривают с поддоном из листа толщиной 6—8 мм, обильно смазанного солидолом. Операцию подъема осуществляют путем постепенного поднятия рулона и передвижения крана. Подъем контролируют угловым сектором, закрепленным на шарнире, а перемещение крана осуществляют по контрольным реперам. Рулон поднимают так, чтобы отклонение полиспада крана от вертикали не превышало допустимого значения  $2\text{--}3^\circ$ , после чего кран

перемещают вперед, компенсируя угол отклонения. Далее этот процесс повторяется (рис. 144). Для плавного опускания рулона на днище трактором натягивают страховочный канат. В резервуарах со стационарной крышей в центре днища устанавливают центральную стойку и закрепляют ее растяжками.

Перед тем как развернуть рулон, его устанавливают так, чтобы кромка полотнища совпадала с осью монтажного стыка. После этого на верху рулона закрепляют канат, обматывают

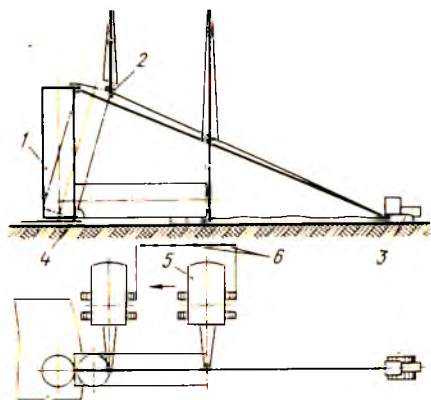


Рис. 144. СХЕМА ПОДЪЕМА РУЛОНА СТЕНКИ РЕЗЕРВУАРА:

1 — рулон; 2 — захват для подъема; 3 — тормозной трактор; 4 — угловой сектор; 5 — канат; 6 — контрольные реперы

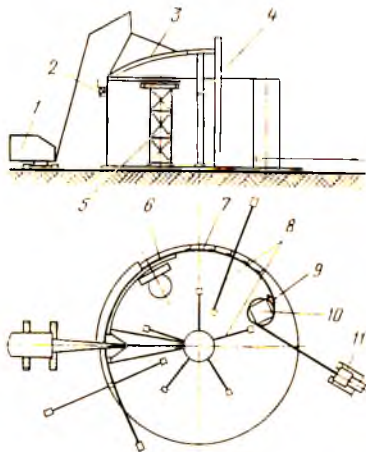


Рис. 145. СХЕМА РАЗВОРАЧИВАНИЯ РУЛОНА СТЕНКИ РЕЗЕРВУАРА:

1 — кран; 2 — навесные леса; 3 — щит покрытия; 4 — монтажная стойка; 5 — стойка для монтажа опорного кольца; 6 — опорное кольцо; 7 — развернутое полотнище стенки; 8 — расчалки; 9 — клиновое упор; 10 — рулон стенки; 11 — трактор

его по спирали и нижний конец натягивают трактором, предотвращая самопроизвольное его раскрытие при срезании планок с монтажной лестницы. Разворачивание рулона начинают с закрепления прихватками кромки полотнища к днищу на расстоянии 3—3,5 м. Для повышения жесткости вертикальной кромки ее подкрепляют трубой (резервуары вместимостью более 5000 м<sup>3</sup>). К рулону на высоте 0,5—0,7 м приваривают скобу, за которую крепят тяговый канат для разворачивания рулона. По мере разворачивания рулона (рис. 145) нижний край полотнища прижимают к уголкам и корпус прихватывают к днищу с двух сторон швами в шахматном порядке. Стенки корпуса к днищу приваривают два сварщика одновременно с двух сторон после разворачивания рулона на 8—10 м. Швы накладывают обратноступенчатым методом с некоторым опережением наложения шва внутри резервуара

на 2—2,5 м. Когда к поверхности сегментного кольца приваривают первый пояс корпуса резервуара, то в швах возникают усадочные усилия  $q$ .

На свариваемую конструкцию действует сила

$$P = q \frac{\pi D (f_1 + f_2)}{F},$$

где  $q$  — усадочное усилие на 1 м длины шва;  $D$  — диаметр резервуара;  $f_1$  и  $f_2$  — поперечные сечения швов, соединяющих первый пояс корпуса резервуара с окрайками;  $F$  — поперечное сечение (приведенное).

Поперечное сечение кольца, образованного окрайками, и его жесткость незначительны. Поэтому сжимающая сила  $P$  деформирует окрайки в направлении касательных к окружности корпуса резервуара. Подобная деформация благоприятна для свариваемой системы, так как способствует уменьшению внутренних напряжений в кольцевом сварном соединении. После сварки кольцевых швов, соединяющих первый пояс с окрайками, в результате деформации зазор в стыках между окрайками изменяется и имеет величину 3—6 мм по всей длине стыка.

Сварку стыковых соединений окрайков выполняют в направлении от периферии к центру в три-четыре слоя каскадным или секционным методом полуавтоматами с применением порошковой проволоки. В месте замыкания вертикального монтажного стыка оставляют недоваренными участки длиной 1500 мм в каждую сторону от стыка. Сварку можно выполнять вручную электродами с основным покрытием, полуавтоматической сваркой под флюсом или полуавтоматической сваркой порошковой проволокой полуавтоматами А-765, А-1035М и А-1197П (табл. 24).

Таблица 24

РЕЖИМ ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКИ ПОРОШКОВЫМИ ПРОВОЛОКАМИ  
ПРИ НИЖНЕМ ПОЛОЖЕНИИ ШВА

| Марка проволоки | Диаметр проволоки, мм | Соединение   | Толщина свариваемого металла, мм | Ток, А  | Напряжение, В | Скорость подачи проволоки, м/ч |
|-----------------|-----------------------|--------------|----------------------------------|---------|---------------|--------------------------------|
| ПП2-ДСК         | 2,3                   | Стыковое     | 14                               | 300—310 | 28—30         | 382                            |
| ПП2-ДСК         | 2,3                   | Тавровое     | 10                               | 300—310 | 28—30         | 382                            |
| ПП2-ДСК         | 2,3                   | Нахлесточное | 7                                | 300—320 | 28—30         | 382                            |
| ПП-АН7          | 2,3                   | То же        | 7                                | 250—300 | 23—25         | 230—260                        |
| ПП-АН3          | 3                     | »            | 6                                | 270—300 | 27—29         | 142                            |
| ПП-АН3          | 3                     | Тавровое     | 10                               | 320—350 | 28—31         | 188                            |

В резервуарах со стационарной крышей одновременно с монтажом стенки устанавливают покрытие после разворачивания 10—12 м полотнища. На верхние кромки полотнища



крепят элемент опорного кольца, прижимая его к верхней кромке струбцинами. Щиты сферического покрытия укрупняют из двух-трех частей на специальном кондукторе. Укрупненный щит подают краном и устанавливают на опорное кольцо и центральный щит. Радиальные щиты соединяют с опорным кольцом на прихватках, а с центральным щитом — на болтах. Щиты между собой сваривают от центра к краям полуавтоматом в среде углекислого газа или порошковой проволокой. Приварку щитов к опорному кольцу и сварку кольца (потолочный шов, косынки) выполняют с подвешенной на внутреннем выступе кольца монтажной люльки или с подмостей.

При монтаже резервуаров с плавающей крышей одновре-

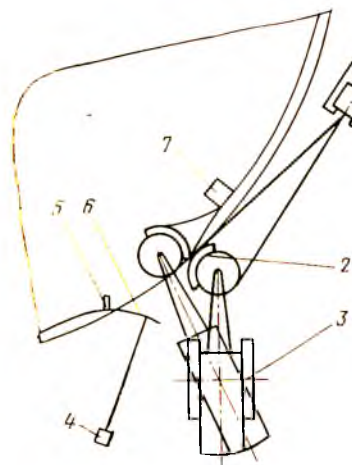


Рис. 146. СХЕМА ПРАВКИ КОНЦОВ ПОЛОТНИЩА:

1 — трактор; 2 — приспособление для правки; 3 — край; 4 — инвентарный якорь; 5 — упор; 6 — выправляемый участок полотнища; 7 — вертикальная опора

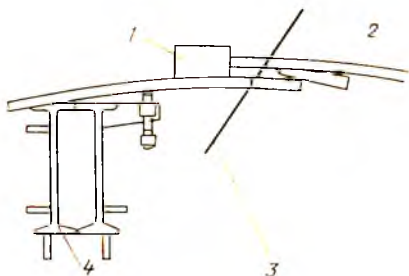


Рис. 147. СХЕМА ЗАМЫКАНИЯ МОНТАЖНОГО СТЫКА СТЕПКИ РЕЗЕРВУАРА:

1 — ограничительная планка; 2 — клин; 3 — ось монтажного стыка; 4 — приспособление для замыкания

менно с разворачиванием рулонов стенки на нее устанавливают верхнюю балконную площадку и промежуточные кольца жесткости (поэлементно). В процессе разворачивания корпуса резервуара выполняют замыкание вертикальных стыков с помощью устройств, предложенных институтом «Гипронсфетс-спецмонтаж». А перед замыканием монтажных стыков выправляют концы полотнищ, деформированных при навивке. Для этого к свободной кромке подводят и крепят гибочные сектора (рис. 146), установленные на стойке или на освобожденном каркасе рулона. Затем канат, закрепленный на каркасе, натягивают трактором, создавая крутящий момент. После завершения формообразования кромок приступают к замыканию монтажного стыка, соединяя вначале внахлестку. Кромки прижимают с помощью клиньев или винтовых прижимов. В первом случае на каждом поясе резервуара приваривают скобы,

в которые устанавливают опорные стойки для клиньев. Во втором случае вдоль монтажного стыка устанавливают вертикальную балку жесткости с винтовыми прижимами (рис. 147). Газовой резкой подгоняют V-образную разделку кромок с раскрытием внутрь резервуара. Сварку начинают внутри резервуара с общим направлением сверху вниз. Стык сваривают с передвижных лесов два-три сварщика вручную обратноступенчатым методом с длиной ступени 200 мм электродами с основным покрытием (УОНИ-13/55). После сварки стыка с наружной поверхности корпуса вырубает корень шва, затем зачищают и подваривают. В зависимости от толщины листов пояса резервуара выполняют различное число слоев: при толщине листа 14 мм — четыре слоя, при толщине 10—12 мм — три слоя и т. д. После сварки и зачистки швы подвергают испытанию: нахлестное соединение проверяют керосиновой пробой, а стыковое соединение просвечивают рентгеновскими лучами. Сварные соединения покрытия резервуара проверяют на плотность смачиванием их мыльным раствором во время создания в резервуаре избыточного давления при гидравлическом испытании готового резервуара.

В заключительной стадии монтажа резервуара собирают и устанавливают шахтную лестницу с помощью крана на анкерные болты фундамента и приваривают ограждения на кровле резервуара.

### **СВАРОЧНЫЕ РАБОТЫ ПРИ ПОЛИСТОВОЙ СБОРКЕ РЕЗЕРВУАРОВ**

Наряду с методом рулонированной сборки резервуарных конструкций применяют полистовую сборку стенки резервуаров вместимостью 50 тыс. м<sup>3</sup> и более. Днище и плавающие крыши собирают из рулонных заготовок, как при рулонном монтаже резервуаров, уменьшая трудоемкость изготовления всей конструкции. Монтаж стенки резервуара начинают после проверки горизонтальности окрасок и разметки днища. Листы первого пояса устанавливают по намеченной риске и соединяют с окрасками с помощью угловых клиновых замков.

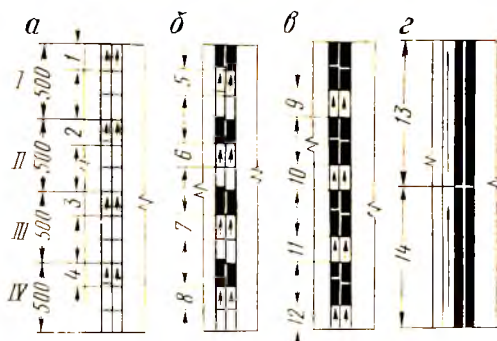
#### **Сварка вертикальных соединений**

Для ручной электродуговой сварки вертикальные стыки собирают поочередно на нижних поясах с зазором  $4 \pm 1$  мм и без зазора. На верхних поясах зазор несколько уменьшают, доводя его до  $3 \pm 1$  мм. Листы каждого пояса собирают с отклонением наружу резервуара на 10—12 мм. В процессе сборки вертикального стыка контролируют проектное положение листов, и смещение кромок допускается в пределах  $\pm 2$  мм, а угловатость по длине стыка при замере шаблоном длиной 1 м должна быть  $\pm 5$  мм. Применение стыков без зазора и от-

клонение листов наружу резервуара позволяет получить требуемую геометрическую форму стыков с обеспечением равномерной усадки вдоль стыка и минимальной деформацией стенки. Для выполнения сварки стыки собираются с V- и X-образной разделкой кромок. Вертикальные стыки резервуара сваривают одновременно 8—10 сварщиков, которые располагаются на диаметрально противоположных стыках и перемещаются в процессе сварочных работ в одном направлении. Вначале сваривают стыки, собранные с зазором, а затем стыки без зазоров. В результате усадки сварных швов линейные деформации приводят к сокращению размеров свариваемых листов. Эти деформации колеблются в пределах 0,05—0,07 %

Рис. 148. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ СВАРКИ ВЕРТИКАЛЬНОГО СТЫКА:

а, б, в — корневого и заполняющего слоев шва; г — облицовочного слоя шва; I—IV — секции вертикального стыка; 1—14 — порядок наложения корневого, заполняющего и облицовочного слоев



линейного размера соединяемых листов. При этом меньшие значения деформаций соответствуют сборке стыков с минимальными зазорами, а большие значения — сборке стыков с максимальными зазорами. Сварку вертикальных стыков из стали класса прочности С38/23 и С46/33 выполняют одновременно два сварщика, расположенные с разных сторон резервуара. Для сварки этих сталей используют электроды марки УОНИИ-13/55. Обычно вертикальный стык разбивают на участки длиной по 160—180 мм и каждый заполняющий слой сваривают в строгой последовательности, указанной на рис. 148. Последний облицовочный слой каждый сварщик выполняет в два приема, начиная от середины листа и его низа. При сварке стыков одним сварщиком последовательность наложения швов та же, но в этом случае начало наложения шва и последующие слои сваривают таким образом, чтобы обеспечить минимальную угловую деформацию листов. После сварки каждого слоя контролируют геометрическую форму стыка. При большой угловой деформации листов швы накладывают с другой стороны резервуара.

Перед сваркой вертикальных стыков резервуаров из стали высокой прочности класса С60/45 торцы листов подогревают горелками марки ГВПИ до температуры 120—160 °С. Темпера-

температуру подогрева контролируют термокарандашами, термокрасками и различными приборами на расстоянии не менее 150 мм от нагреваемых торцов листов. После этого листы сваривают секционным способом с наложением ступеней в два слоя (рис. 149). Первый сварщик накладывает два слоя шва участками длиной 160—180 мм в первой верхней секции с одной стороны стенки резервуара. После выполнения корневого слоя шва первым сварщиком готовят стык для второго сварщика. Для этого абразивным кругом удаляют корень шва и второй сварщик выполняет сварку заполняющего и облицовочного слоя шва в первой секции. Первый сварщик накладывает облицовочные слои шва в первой секции и два запол-

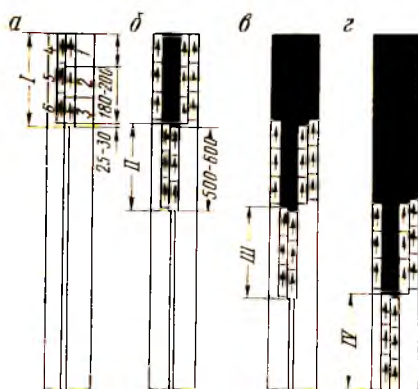


Рис. 149. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ СВАРКИ ВЕРТИКАЛЬНОГО СТЫКА ИЗ СТАЛИ КЛАССА ПРОЧНОСТИ С60/45:

а, б, в — корневого, заполняющего и облицовочного слоев первым сварщиком; г — заполняющего и облицовочного слоев вторым сварщиком; I—IV — секции вертикального стыка; 1—6 — порядок выполнения корневого и заполняющего слоев первым сварщиком

няющих слоя во второй секции. Далее процесс выполнения сварочных работ повторяется и выдерживается до окончания сварки всего вертикального стыка.

При выполнении вертикальных стыков сварочные работы выполняют сначала с той стороны, где имеется выпучивание собранного стыка на 2—5 мм. Это позволяет за счет угловых сокращений металла шва иметь угловую деформацию, обеспечивающую требуемую цилиндрическую поверхность соединяемых листов. Листы из стали класса прочности С60/45 сваривают электродами марки УОНИ-13/65 диаметром 4 мм. В процессе проведения сварочных работ особое внимание уделяют началу сварки вертикального шва и концу ее с тем, чтобы при выполнении горизонтальных швов в местах пересечения не оказалось шлаковых включений, кратеров и непроваров.

После окончания сварочных работ на вертикальных стыках газовой резкой удаляют шайбы и зачищают места реза абразивным инструментом. Далее проверяют угловые деформации стыков, цилиндричность пояса в верхних и нижних точках и отклонение от вертикали. Сварку вертикальных стыков порошковой проволокой с принудительным формированием шва при-

меняют для листов толщиной 10—25 мм. Листы из стали марки 09Г2С собирают и закрепляют при помощи трех сборочных приспособлений с зазором 12 мм для толщин до 15 мм включительно и 14 мм для толщин 20—22 мм. Допускаемое отклонение зазора может быть  $\pm 1$  мм, а смещение кромок не более 1 мм. При сварке с принудительным формированием шва порошковой проволокой качественные вертикальные швы получают, соединяя листы толщиной до 24 мм без разделки кромок. Листы первого пояса резервуаров вместимостью 50 тыс. м<sup>3</sup> и более для сварки с принудительным формированием собирают с зазором 2—6 мм. Кромки листов готовят на заводе с Х-образной разделкой без притупления со скосом 45°. Вертикальный стык сваривают с принудительным формированием шва с двух сторон. При сварке первого слоя шва с наружной стороны резервуара шов формируют водохлаждаемой медной трубкой и ползуном. Медную трубку устанавливают с внутренней стороны резервуара в разделку и удерживают пружинами, закрепленными в проушинах для монтажа рельсового пути, по которому перемещается автомат при сварке второго слоя шва. Второй слой шва формируют с внутренней стороны резервуара между первым слоем шва и ползуном после зачистки абразивным инструментом предыдущего слоя.

Для сварки вертикальных стыков с принудительным формированием шва с двух сторон применяют автомат А-1381 и порошковую проволоку ПП-2ВДСК диаметром 2,35 мм. Вертикальные стыки второго пояса и всех последующих собирают по технологии, описанной ранее, но только с той особенностью, что для вывода кратера шва за пределы пояса применяют инвентарное приспособление, заменяющее выводные планки. Использование инвентарного приспособления позволяет сократить время на установку и снятие его, а также обеспечить формирование шва между медными сухариками, что позволяет многократно применять данное приспособление. После вывода шва за пределы листов приспособление снимают, а шов удаляют газовой резкой с зачисткой абразивным инструментом.

Для сварки вертикальных стыков используют автомат А-1150У, обеспечивающий принудительное формирование шва с помощью ползунов, которые перемещаются вместе с автоматом по стыку. Автоматическая сварка начинается с подачи порошковой проволоки в зону плавления. Для получения качественного наплавленного металла в начале процесса плавления и в процессе вынужденной остановки автомата осуществляется дополнительная защита зоны сварки углекислым газом в течение 30—45 с. При этом образующийся от плавления порошковой проволокой расплавленный шлак и газовая среда надежно защищают жидкий металл от вредного влияния атмосферы. Перемещение ползунов начинается по стыку



в тот момент, когда уровень металлической ванны находится ниже верхней кромки переднего ползуна на 10—15 мм.

Вертикальные стыки сваривают без перерыва процесса, но в случае вынужденной остановки автомата формирующие ползуны устанавливают ниже верхней точки сварного шва на 6—8 мм и процесс начинается с выплавления кратера. После расплавления выступающей части шва и получения достаточного количества шлака начинается перемещение аппарата по вертикали. Автоматическую сварку вертикальных стыков стенок резервуара осуществляют на постоянном токе обратной полярности, обеспечивая подачу сварочного тока от преобразователя ПСГ-500. Сварка производится без подогрева стыка при температуре не ниже  $-20^{\circ}\text{C}$  при следующем режиме:

|                                             |          |
|---------------------------------------------|----------|
| Толщина свариваемого металла, мм . . . . .  | 10—25    |
| Диаметр электродной проволоки, мм . . . . . | 2,35     |
| Марка проволоки . . . . .                   | ПП-2ВДСК |
| Напряжение, В . . . . .                     | 24—30    |
| Сварочный ток, А . . . . .                  | 270—300  |
| Скорость сварки, м/ч . . . . .              | 4—6      |

### Сварка стенки резервуара с сегментным кольцом

Стенки резервуара с сегментным кольцом соединяют полуавтоматической сваркой с применением порошковой проволоки. Сварочные работы выполняют несколько сварщиков, которые располагаются по окружности резервуара с наружной и внутренней стороны в диаметрально противоположных местах и перемещаются по мере сварки в одном направлении. Оба шва (снаружи и внутри) сваривают одновременно обратноступенчатым способом (длина ступени 700—800 мм) с некоторым опережением одного из них. В первую очередь сваривают наружный шов, при этом по мере приближения к сборочным приспособлениям (упорам) их срезают ацетилено-кислородным пламенем. Наружный шов выполняют в три слоя, а внутренний — в два. При сварке стенки резервуара с сегментным кольцом из окraек вместо полуавтоматической сварки допускается применять ручную. В этом случае сварку осуществляют обратноступенчатым способом с длиной ступени, равной длине шва от расплавления одного электрода, и на каждом участке 700—800 мм (перед выполнением следующего участка) накладывают не менее двух слоев.

### Сборка и сварка последующих поясов стенки резервуаров

Перед установкой второго пояса резервуара разворачивают полотно крыши с установкой минимальной нахлестки между рулонными заготовками размером не менее



40 мм. Порядок сборки и сварки полотнищ крыши резервуара используется аналогичный, как при монтаже днища. Процесс монтажа второго пояса резервуара начинается с зачистки кромок абразивным диском от шлифовальной машинки и установки на первом поясе трех-четырех сборочных приспособлений по краям листа и одного-двух посередине. Первый лист второго пояса устанавливают на проектное место с инвентарных подмостей и закрепляют клиньями в отверстиях шайб, совмещая кромки листов смежных поясов и обеспечивая требуемый зазор в горизонтальном стыке. Последующие листы монтируют вправо и влево от первого листа с созданием требуемых зазоров в горизонтальных и вертикальных стыках. На последнем (замыкающем) листе шайбы устанавливают в соответствии с расположением шайб на примыкающих листах. Вертикальные стыки сваривают по технологии, которая используется для стыков первого пояса. Для ручной электродуговой сварки горизонтальных стыков листы собирают с зазором  $4 \pm 1$  мм, смещение кромок допускается не более 2 мм. Сварку горизонтальных стыков выполняют четыре-пять пар сварщиков. Каждая пара сварщиков работает на диаметрально противоположных участках. Стык сваривают два сварщика. Один сварщик находится внутри резервуара, а другой — снаружи. Горизонтальные стыки нижних поясов (с толщиной стенки 13—22 мм) имеют К-образную разделку кромок, а стыки верхних поясов — V-образную. Сварку горизонтальных стыков К-образной разделкой начинают внутри резервуара с наложением слоев секционным методом. Длину секции принимают 600—800 мм, а каждый наплавляемый участок шва составляет 200—230 мм. Сварщик наплавляет корневой слой тремя участками 1—3, а затем по ним накладывает еще три 4—6 заполняющих валика (рис. 150, а). С наружной стороны удаляют корень шва, и второй сварщик сваривает свою секцию. Далее первый сварщик выполняет сварку второй секции (рис. 150, б), наплавляя два заполняющих слоя шва. В первой секции этот сварщик сваривает облицовочный слой. После этого порядок сварки слоев повторяется (рис. 150, в).

Сварку горизонтальных стыков с V-образной разделкой ведут снаружи резервуара с соблюдением последовательности наложения слоев, выполняемых первым сварщиком. Второй

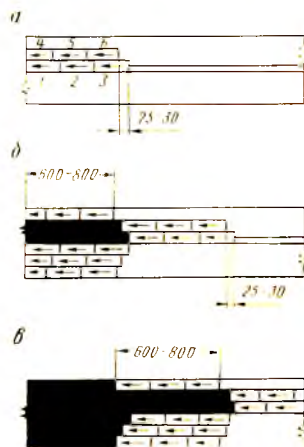


Рис. 150. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ СВАРКИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СТЫКОВ РЕЗЕРВУАРА

сварщик внутри резервуара выполняет подварку корня шва. Сварку горизонтальных стыков из стали класса прочности С38/23 и С45/23 выполняют электродами марки УОНИ-13/55, а стали класса прочности С60/45 — электродами марки УОНИ-13/65. Перед сваркой листов из стали высокой прочности класса С60/45 их подогревают и выдерживают технологию, как для вертикальных стыков.

Для полуавтоматической сварки горизонтальных стыков в среде углекислого газа листы из стали 09Г2С собирают с зазором  $3 \pm 1$  мм с максимальным смещением листов не более 2 мм. Все стыки имеют К-образную форму кромок, и швы выполняют с наложением от 4 до 11 валиков. При сварке полуавтоматами на резервуаре можно применять одновременно несколько установок, которые комплектуются по две. На резервуаре каждая пара установок находится в диаметрально противоположных сторонах. Две полуавтоматические установки выполняют сварку снаружи и внутри резервуара одновременно в одной секции длиной 600—700 мм. Сварщики и установки находятся в кабинах, которые навешивают на стенку резервуара. За одну установку кабины сварщики имеют возможность сварить четыре секции горизонтального стыка.

При выполнении сварочных работ требуется большее количество наплавленного металла обеспечить с наружной стороны, что связано с изменением толщины стенок резервуара по поясам и расположением наружных плоскостей листов со смещением. После сварки первого слоя в пределах одной секции с наружной стороны резервуара сварщик выполняет второй слой. В это время второй сварщик внутри резервуара выполняет первый слой шва. Каждый слой шва накладывают после зачистки предыдущего слоя при помощи стальной щетки.

При сварке горизонтальных швов в среде углекислого газа горелку полуавтомата перемещают с некоторыми колебаниями. Первый слой шва сваривают, придавая электроду возвратно-поступательное движение вдоль свариваемых кромок и обеспечивая проплавление верхних и нижних кромок. Последующие заполняющие слои шва выполняют, придавая электроду круговые движения. Облицовочный слой шва обычно выполняют, создавая возвратно-поступательные движения горелке и обеспечивая обратное направление сварки по отношению к предыдущим слоям шва. Корневой слой шва и все заполняющие швы выполняют слева направо при движении горелки углом назад, а облицовочный слой сваривают справа налево — углом вперед.

В процессе сварки первого слоя шва между верхним вертикальным листом и горелкой обеспечивают угол  $75-80^\circ$ , что способствует лучшему провару корня. При зазоре между кромками листов 1—1,5 мм этот угол увеличивают до  $85-90^\circ$ . Для последующих заполняющих слоев шва обеспечивают угол

между верхним вертикальным листом и горелкой  $55-60^\circ$  и последний слой шва сваривают с наклоном горелки  $90-95^\circ$ . В процессе сварки секции сварщик не меняет своего положения, так как перед началом работы он находится на расстоянии  $\frac{3}{4}$  длины секции.

Полуавтоматическую сварку в среде углекислого газа горизонтальных соединений резервуара выполняют на постоянном токе обратной полярности на следующем режиме:

|                                          |         |
|------------------------------------------|---------|
| Толщина листов, мм . . . . .             | 12—26   |
| Сварочный ток, А . . . . .               | 250—270 |
| Напряжение, В . . . . .                  | 27—30   |
| Скорость подачи проволоки, м/ч . . . . . | 159     |
| Вылет электрода, мм . . . . .            | 25—30   |
| Расход газа, л/мин . . . . .             | 10—12   |
| Скорость сварки, м/ч . . . . .           | 0,5—3   |

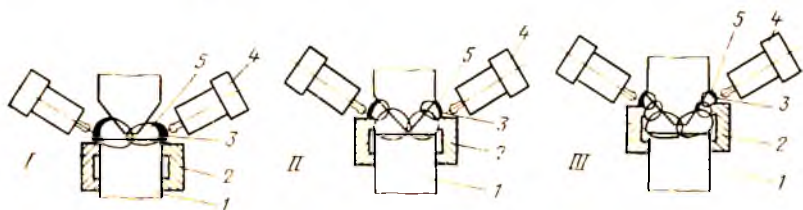


Рис. 151. СХЕМА ПРОЦЕССА СВАРКИ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО СОЕДИНЕНИЯ С ПОЛУПРИНУДИТЕЛЬНЫМ ФОРМИРОВАНИЕМ ШВА:

I—III — рядок сварки стыка; 1 — стенка резервуара; 2 — ползун; 3 — шлак; 4 — сварочная горелка; 5 — сварочная ванна

Наиболее распространенным способом выполнения горизонтальных соединений является сварка порошковой проволокой с полупринудительным формированием шва одновременно с двух сторон. При этом способе валик наплавленного металла формируется специальным устройством в виде бесконечной цепи, состоящей из большого числа медных блоков, которая при сварке обкатывает стенку резервуара на несколько миллиметров ниже кромок шва (рис. 151).

Для полупринудительного формирования горизонтального шва применяют установку «Циркоматик», которая состоит из передвижного устройства 1, автономного источника сварочного тока 3, автоматического сварочного оборудования 2 и баллона с редуктором 4 (рис. 152). Передвижное устройство имеет ходовую тележку с алюминиевым покрытием. Две кабины передвижного устройства оборудованы раздельными верхними и нижними рамными каркасами с рабочей платформой. Для совместной работы сварщиков имеется радиопереговорное устройство. Скорость перемещения кабин измеряют тахометром. Из одной кабины в другую можно перейти по двойной лестнице. Автономный источник сварочного тока

имеет два выпрямителя модели ТО-800, рассчитанные на напряжение 220—380 В и частоту переменного тока 50 Гц. Включают источники питания от шкафа управления. Автоматическое сварочное оборудование состоит из двух сварочных головок, предназначенных для сварки порошковой проволокой с полупринудительным формированием шва. В каждой кабине установлен пульт управления, соленоидный клапан для углекислого газа. Подогрев газа осуществляется подогревателями. Давление газа регулируют редуктором, а его количество учитывается расходомером. Если по какой-либо причине газ не поступает в зону сварки, то оператора предупреждают звуковым и световым сигналом. Перед сваркой кромки листов очищают стальными щетками или абразивным инструментом от ржавчины. Листы при сборке имеют К-образную разделку кромок с углом раскрытия 45°. Притупление верхних кромок составляет 2—3 мм, а зазор при сборке 0—2 мм.

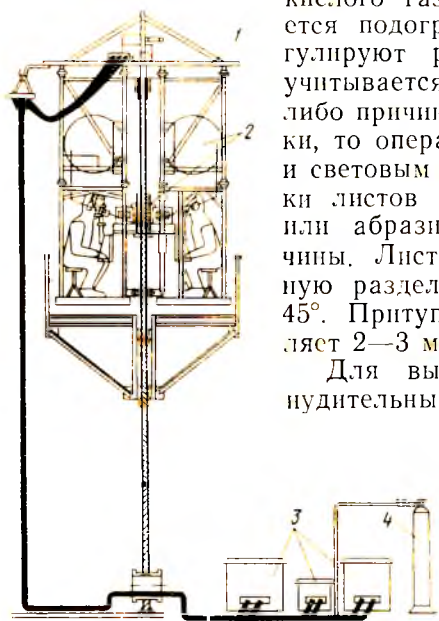


Рис. 152. АВТОМАТИЧЕСКАЯ УСТАНОВКА ДЛЯ СВАРКИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СТЫКОВ СТЕНКИ РЕЗЕРВУАРА С ПОЛУПРИНУДИТЕЛЬНЫМ ФОРМИРОВАНИЕМ ШВА

Для выполнения стыков с полупринудительным формированием шва сборка листов проводится двумя способами: с зазором 3—4 мм с использованием зазорных планок и последующей сваркой корневого шва вручную, без зазора на прихватках. При первом способе каждый стык собирают на шестистяжных планках, а далее наносят прихватки по стыку длиной 40—50 мм с расстоянием

между ними 300—350 мм. Оканчивается сборка ручной сваркой. Высокое качество сварочных работ и производительность достигаются при втором способе сборки, без зазора, когда листы собирают, как и ранее, на прихватках. При автоматической сварке горизонтальных швов на листах из стали 09Г2С прихватки производят электродами УОНИ-13/55 диаметром 2,5—3 мм. Прихватки и ручную подварку горизонтального шва выполняют только с внутренней стороны резервуара. Ручную подварку корня шва при втором способе сборки выполняют в тех местах, где при сборке листов снимают лишний металл газовым резаком. Для выполнения горизонтального шва автоматической установкой «Циркоматик» абразивным инструментом зачищают верх нижнего листа по всей длине на ширину

80—100 мм от центра стыка. Кроме этого, шлифовальной машиной зачищают места среза от шайб и удаляют с двух сторон усиление шва вертикальных соединений на ширину 80—100 мм. Процесс сварки на установке «Циркоматик» начинается с перемещения кабины по стенке резервуара и подачи тока на два сварочных поста. После возбуждения дуги каждый сварщик регулирует ток и напряжение реостатами, которые расположены на пульте управления перед сварщиком и регуляторе выносного реостата. Глубину проплавления регулирует каждый сварщик по цвету зоны нагрева металла соединения или шва. Применение установок «Циркоматик» позволяет резко увеличить производительность работ за счет увеличения скорости сварки (табл. 25).

Таблица 25

РЕЖИМЫ АВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СТЫКОВ  
ПОРШКОВОЙ ПРОВОЛОКИ ПП-АНЗС С ЗАЩИТОЙ УГЛЕКИСЛЫМ ГАЗОМ

| Толщина свариваемого металла, мм | Число проходов с каждой стороны стенки | Расстояние между дугами, мм | Сварочный ток, А | Напряжение, В | Угол наклона электрода, градусы | Скорость сварки, м/ч |
|----------------------------------|----------------------------------------|-----------------------------|------------------|---------------|---------------------------------|----------------------|
| 12—12                            | 1                                      | 70                          | 400—420          | 21—22         | 20                              | 20                   |
| 14—14                            | 1                                      | 70                          | 420—440          | 21—22         | 20                              | 18,3                 |
| 14—16                            | 1                                      | 60                          | 430—450          | 21—22         | 25                              | 17                   |
| 16—18                            | 1—2                                    | 60                          | 430—450          | 22—23         | 30                              | 14,9                 |
| 18—20                            | 2                                      | 50                          | 440—460          | 23—24         | 30                              | 13,2                 |
| 20—23                            | 2                                      | 50                          | 450—480          | 24—25         | 35                              | 11,9                 |
| 23—26                            | 3                                      | 50                          | 450—500          | 24—25         | 35                              | 9,5                  |

При выполнении горизонтальных швов из стали 16Г2АФ автоматической установкой «Циркоматик» необходимо обеспечивать допустимую скорость охлаждения металла в процессе сварки. Требуемый тепловой режим сварки при положительной температуре обеспечивают, изменив расстояние между дугами до 100 мм и проводя процесс с погонной энергией 18—22 кДж/см. Для сварки стали 16Г2АФ применяют проволоку ПП-АН19 без дополнительной защиты зоны сварки углекислым газом на следующих режимах:

| Толщина свариваемого металла, мм | Число проходов с каждой стороны стенки | Скорость сварки, см/мин |
|----------------------------------|----------------------------------------|-------------------------|
| 14 . . . . .                     | 1                                      | 40—50                   |
| 14 . . . . .                     | 1                                      | 40—50                   |
| 16 . . . . .                     | 1—2                                    | 40—50                   |
| 18 . . . . .                     | 2                                      | 50                      |
| 20 . . . . .                     | 2                                      | 50                      |
| 23 . . . . .                     | 3                                      | 50                      |

Примечание. Сварочный ток 480—550 А, напряжение 26—28 В.



Приведенные режимы используют только до температуры воздуха 0 °С. При более низкой температуре автоматическую сварку ведут с предварительным подогревом свариваемых кромок до температуры 160—200 °С.

### **Монтаж резервуара из укрупненных блоков**

При сооружении резервуаров большой вместимости значительное время затрачивается на подготовку вертикального стыка для сварки, особенно при выполнении работ на высоте. Эти работы можно упростить, обеспечив сварку двух листов перед монтажом. Листы длиной 6 м укрупняют в блоки 12 м на поворотных приспособлениях. Перед сваркой производят сборку двух листов с требуемым зазором и созданием допустимого смещения кромок. Листы фиксируют зажимами. Первый слой шва сваривают вручную, а затем после очистки поверхности от шлака осуществляют автоматическую сварку под слоем флюса сварочным трактором ТС-17М. После автоматической сварки всех слоев с одной стороны листы поворачивают на 180° и сваривают другие слои под слоем флюса. Поднимают блоки на проектную отметку траверсой длиной 6 м с саморегулирующимися стропами.

### **Монтаж крыши и дополнительного оборудования**

Сборку плавающей крыши начинают с монтажа коробов понтона. Эти короба устанавливают на днище и производят ручную сварку всех слоев швов с последующим испытанием плотности швов керосином. После испытания резервуара на плотность сливают воду до уровня 1,9 м и устанавливают стойки на крыше. С окончанием этих работ удаляют воду из резервуара и вручную сваривают в потолочном положении соединения между коробами, полотнища крыши с понтоном, патрубки опорных стоек с крышей и т. п.

---

## *Глава 15*

### **СВАРКА АРМАТУРЫ ЖЕЛЕЗОБЕТОННЫХ КОНСТРУКЦИЙ**

При строительстве объектов нефтяной и газовой промышленности часто применяют железобетонные конструкции. Способы сварки арматуры железобетонных конструкций можно разделить на две группы. К первой группе относятся способы сварки, которые используются на специализированных заводах арматурных и железобетонных конструкций, в арма-



турных цехах и т. п. (в основном электроконтактная сварка). Вторая группа включает способы сварки, применяемые непосредственно на строительных площадках для соединения отдельных стержней в месте укладки бетонной смеси или замоноличивания стыков, — ванную одноэлектродную и многоэлектродную, ванную полуавтоматическую под флюсом, дуговую с принудительным формированием и т. п.

### ВАННАЯ ОДНОЭЛЕКТРОДНАЯ СВАРКА АРМАТУРЫ

Ванную и ванно-шовную одноэлектродную сварку применяют для соединения арматуры встык (рис. 153) или взаимно пересекающихся стержней в монтажных условиях. Для предупреждения вытекания расплавленного металла стыки собирают на фасонной охватывающей стальной подкладке. Ванную сварку стержней выполняют электродами, используемыми для ручной дуговой сварки. Наибольшее распространение находят электроды с основным (фтористокальциевым) покрытием Э42А, Э50А и Э55, а для соединения элементов закладных деталей и арматуры класса А-1 — электроды с рутиловым покрытием Э42 и Э46.

Для соединения накладных элементов с закладными деталями и стержней из стали класса А-1 между собой протяженными или многослойными швами применяют также электроды с руднокислым или пльменитовым покрытием Э42, однако по своим технологическим и гигиеническим свойствам они уступают электродам с рутиловым покрытием. Сборку арматурных стержней осуществляют с минимальным зазором. Зазор устанавливают в зависимости от диаметра электрода и удобства манипулирования им в плавильном пространстве. При сварке мелкой арматуры (диаметром до 10 мм) зазор устанавливают  $1,5 d_0$  ( $d_0$  — диаметр электрода с покрытием), а для тяжелой арматуры —  $2 d_0$ .

При подготовке под сварку стержни обрезают ацетиленокислородной резкой таким образом, чтобы смещение осей стержней в стыках (несоосность) не превышало  $0,03D$  ( $D$  — номинальный диаметр стержня) и угол перелома осей был не более  $3^\circ$ . Для уменьшения несоосности стержни нагревают пламенем горелки (на расстоянии 70—100 мм от бетона) и отгибают в нагретом состоянии. Срезанные торцы и боковые поверхности стержней зачищают от грата, заусенцев и ржавчины на длине 30—40 мм с помощью молотка и металлической щетки. Форму устанавливают на стык симметрично относительно межцентрового зазора (с точностью  $\pm 5$  мм) и прихватывают в четырех точках. Прихватку выполняют на токе 150—200 А во избежание образования подрезов на стержнях. Прихватку выполняют с направлением дуги в сторону формы. Прокладку и форму для сварки стержней изготавливают из низ-

коуглеродистой стали. При сварке стержней разных диаметров между стержнем меньшего диаметра и формой устанавливают скобообразную стальную подкладку толщиной, равной половине разности наружных диаметров стыкуемых стержней, обеспечивая боковые зазоры не более 2—3 мм.

Сварку вертикальных стержней на желобчатой подкладке начинают с возбуждения дуги на подкладке в корне шва. Затем поочередно оплавливают кромки торцов обоих стержней на глубину 2—5 мм, создавая общую ванну расплавленного металла. Далее при оплавлении торцов электроду обеспечивают зигзагообразные движения, в результате чего избыточный шлак

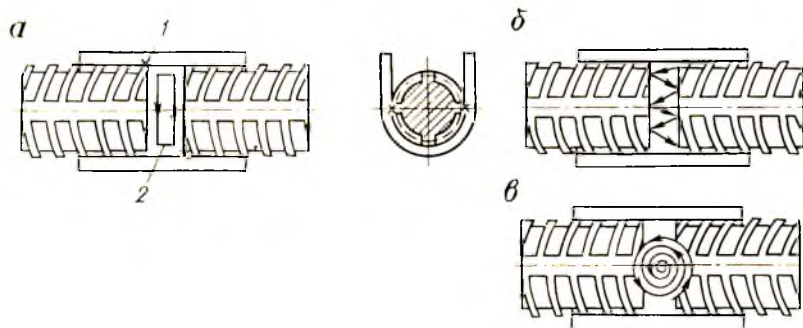


Рис. 153. СБОРКА И СВАРКА ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СТЕРЖНЕЙ ВАННО-ШОВНОЙ СВАРКОЙ:

*а* — при малом зазоре; *б* — при большом зазоре; *в* — сварка на завершающем этапе; 1 — место прихваток; 2 — перемещение торца электрода

и часть расплавленного металла выводятся через прорезы. Заканчивают сварку на верхнем стержне кольцевой валиковой наплавкой, обеспечивающей плавное сопряжение наплавленного металла со стержнем. Сварку горизонтальных стержней проводят при минимальных межторцовых зазорах одиночным электродом, что позволяет качественно проварить труднодоступный корень шва. В процессе сварки обеспечивают максимальную непрерывность процесса (продолжительность перерывов на смену электрода не должна превышать нескольких секунд). При сварке арматуры средних и больших диаметров первые два электрода расплавляют без перерыва, закладывая их в держатель с противоположных сторон. Сварочный ток при сварке вертикальных и горизонтальных стержней (табл. 26) зависит от их диаметра, диаметра электрода, конструкции стыка и температуры окружающей среды.

В начале сварки горизонтальных стержней дугу зажигают в зазоре и медленно перемещают вдоль него, проплавляя нижнюю кромку одного торца. Затем дугу быстро перемещают к нижней кромке второго торца, создавая аналогичную ванну.

## РЕЖИМЫ СВАРКИ ВАННЫМ СПОСОБОМ

| Диаметр<br>стержня, мм | Горизонтальные стыки          |                                        |                    | Вертикальные стыки            |                                        |                    |
|------------------------|-------------------------------|----------------------------------------|--------------------|-------------------------------|----------------------------------------|--------------------|
|                        | Диаметр<br>электро-<br>да, мм | Сварочный ток (в А)<br>при температуре |                    | Диаметр<br>электро-<br>да, мм | Сварочный ток (в А)<br>при температуре |                    |
|                        |                               | положи-<br>тельной                     | отрицатель-<br>ной |                               | положи-<br>тельной                     | отрица-<br>тельной |
| 20                     | 5                             | 230                                    | 250                | 5                             | 170                                    | 190                |
| 28                     | 5                             | 250                                    | 275                | 5                             | 270                                    | 290                |
| 40                     | 5—6                           | 275—300                                | 300—330            | 5                             | 275                                    | 300                |
| 60                     | 6—7                           | 400—420                                | 430—450            | 6                             | 330                                    | 350                |
| 70                     | 6—8                           | 450—500                                | 470—500            | 6                             | 350                                    | 380                |

В дальнейшем обе ванны объединяют, обеспечивая форсированное расплавление электрода и перемещение по схеме, изображенной на рис. 153, б. В результате происходит постепенное заполнение всего зазора. Избыточный шлак, образующийся во второй половине процесса, удаляется через отверстие, которое прожигают электродом на высоте 4—6 мм выше уровня жидкого металла. Заканчивается процесс наплавкой усиления высотой 5—10 мм, которое обеспечивает выведение усадочной рыхлости и газовых пор за пределы рабочего сечения шва.

При ванной сварке на постоянном токе применяют электроды Э42 и Э46 для стали Ст3, Э50А — для сталей Ст5, 10ГТ и 18Г2С, Э50А и Э55 — для сталей 35ГС и 25Г2С. При сварке элементов из сталей различной прочности электроды выбирают для стали с меньшим временным сопротивлением, за исключением случаев, когда в соединениях имеется хотя бы один стержень из стали Ст5 или 35ГС.

Питание электрической дуги при сварке ванным способом осуществляется от трансформаторов ТД-500, ТС-500, ТС-300, ТСК-500, ТД-300, ТД-304, выпрямителей ВД-301, ВД-302, ВД-303 и преобразователей ПСО-300, ПСО-500 и др.

### ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКАЯ ВАННАЯ СВАРКА ПОД ФЛЮСОМ

Для соединения арматуры вертикальных и горизонтальных стержней в монтажных условиях применяют полуавтоматическую сварку под флюсом, которую осуществляют в медных или графитовых разъемных формах, на медных или графитовых съемных подкладках, на стальных или керамических подкладках. Наиболее часто при сварке под флюсом применяют медные и графитовые разъемные формы, а также медные съемные подкладки. Разъемные формы изготавливают из меди М1, М06, М0 или искусственного графита ЭГ0, ЭГ1, ГМЗ,

ЭЭГ, ППГ. Сборку стыков под сварку осуществляют с применением ацетилено-кислородной резки, обеспечивающей подгонку смещения осей стержней в стыках на величину не более 0,05 номинального диаметра стержня и угол перелома осей стержней не более  $3^\circ$ . После подгонки стержней срезают кромки и обрабатывают торцы.

Горизонтально расположенные стержни готовят к сварке по схеме, изображенной на рис. 154. Между стержнями устанавливают зазоры  $l_1 = 12 \div 20$  мм — для рекомендуемой разделки и  $l_2 = 5 \div 12$  мм — для разделки, допускаемой во время освоения процесса. Разъемные формы (рис. 154, а) и съемные под-

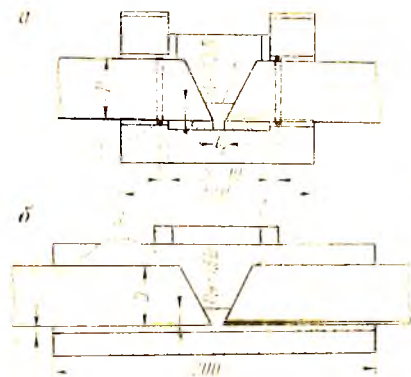


Рис. 154. УСТАНОВКА РАЗЪЕМНЫХ ФОРМ И МЕДНОЙ ПОДКЛАДКИ:

а, б — горизонтальные стержни; 1 — флюс; 2 — шнуровой асбест; 3 — центрирующая рамка

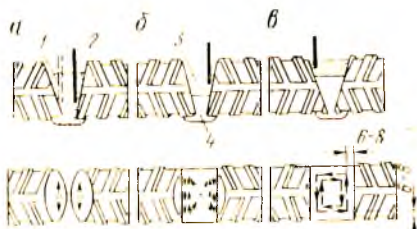


Рис. 155. СХЕМА ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОДНОЙ ПРОВОЛОКИ ПРИ СВАРКЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО СТЕРЖНЯ:

а — в момент возбуждения дуги; б — в процессе заполнения разделки; в — при окончании процесса; 1 — флюс; 2 — электродная проволока; 3 — шлаковая ванна; 4 — металл шва

кладки (рис. 154, б) устанавливают в центре стыка и крепят к стержням струбцинами. Боковые зазоры между цилиндрическими поверхностями формы и стержнями более 2,5 мм заделывают шнуровым асбестом. Для обеспечения сварочного процесса на дно разъемной формы насыпают флюс (20—30 г), а на желобчатую подкладку — слой высотой 5—7 мм. Электрическую дугу возбуждают на торце одного из стержней при вылете электрода 40—50 мм. Электродную проволоку направляют в разделку и сообщают ей колебательные движения поперек осей стержней в пределах межторцового зазора (рис. 155, а), проплавляя нижнюю часть одного стержня в течение 5—15 с. Затем проволоку резко перемещают ко второму стержню, который проплавляют аналогичным образом. Далее процесс осуществляется в центре стыка (рис. 155, б) с обеспечением колебательных движений. Заканчивают процесс, быстро перемещая конец электродной проволоки по периметру шлаковой ванны, отступая от него на 6—8 мм (рис. 155, в).

Для сварки горизонтальных стержней диаметром 45 мм и более используют присадочную крупку в виде опилок, получаемых при резке стали механической пожовкой, или рубленую проволоку (табл. 27). Чаще применяют размерную крупку рубкой проволоки диаметром 6—10 мм на отрезки длиной 6—8 мм. Во время сварки присадку выполняют «поштучно» в любом месте поверхности шлаковой ванны, что снижает вероятность замыкания электродной проволоки на присадку, а кроме того, рука сварщика занята не постоянно, как во время применения прутковой присадки.

Оптимальная доля присадочного металла в шве 25—35 %.

Таблица 27

РЕЖИМЫ ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКИ ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ СТЕРЖНЕЙ

| Диаметр стержня, мм | Скорость подачи проволоки, м/ч | Напряжение, В | Сварочный ток, А | Вылет электрода, мм | Глубина шлаковой ванны, мм |
|---------------------|--------------------------------|---------------|------------------|---------------------|----------------------------|
| 20—25               | 290—310                        | 42—38         | 300—400          | 30—60               | 10—15                      |
| 28—32               | 370—400                        | 44—40         | 350—450          | 30—80               | 10—20                      |
| 36—40               | 460—500                        | 46—42         | 400—500          | 40—80               | 15—20                      |
| 45—50               | 550—600                        | 48—44         | 550—650          | 50—90               | 15—20                      |
| 55—60               | 560—600                        | 50—46         | 550—650          | 50—90               | 15—20                      |
| 70—80               | 630—650                        | 50—48         | 650—700          | 50—90               | 15—20                      |

Примечание. Диаметр электродной проволоки 2 мм.

Вертикальные стержни готовят под сварку (срезка концов) в зависимости от диаметра стержней, определяющих рациональную форму разделки и тип формы. При освоении полуавтоматического процесса между стержнями устанавливают зазор 5—15 мм. Если между цилиндрическими поверхностями формы и нижним стержнем имеется зазор 1,5—2 мм, то устанавливают уплотнение из шнурового асбеста, которое предотвращает вытекание шлака. Перед сваркой рабочее пространство формы заполняют флюсом на высоту 6—8 мм выше скоса нижнего стержня. Сварочный процесс начинают с возбуждения электрической дуги на торце нижнего стержня (рис. 156, а). В начале сварки электродную проволоку перемещают на нижнем торце, сообщая ей поперечные колебания, а затем переходят в центральную часть торца (рис. 156, б). С поднятием уровня ванны электродную проволоку направляют под разделку верхнего стержня (рис. 156, в), сообщая ей поперечные колебательные движения. Так заправляют пространство, пока уровень шлаковой ванны не достигает верхней точки среза торца. Завершают сварочный процесс быстрыми полукруговыми движениями электродной проволоки (рис. 156, г) в течение 10—20 с вдоль стенки формы при зазоре 6—8 мм между формой и проволокой. При сварке вертикальных стерж-



ней диаметром 20—28 мм (32—40 мм) напряжение уменьшают первый раз до 34—35 В (38—40 В) после окончания проплав-ления торца нижнего стержня и второй раз до 26—30 В (32—35 В), когда уровень ванны достигнет среза верхнего стержня.

Сварка вертикальных стержней со скосом торца нижнего стержня «от сварщика» в форме с передним подвижным элементом обеспечивает доступ держателя и проволоки ко всем точкам свариваемых стержней (рис. 157). Сварщик возбуждает дугу на торце нижнего стержня (рис. 158, а). Поперечными

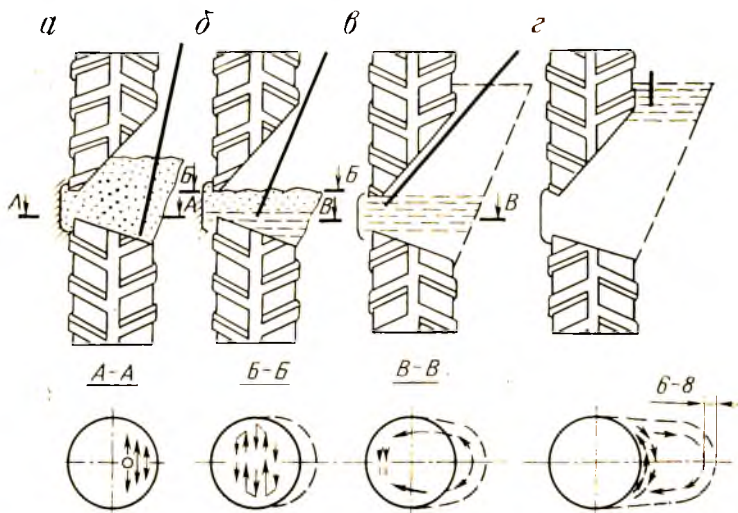


Рис. 156. СХЕМА ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОДНОЙ ПРОВОЛОКИ НА РАЗЛИЧНЫХ СТАДИЯХ СВАРКИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТЕРЖНЕЙ:

а — в момент возбуждения дуги; б — в процессе сварки торца нижнего стержня; в — при сварке корня шва; г — на заключительном этапе сварки

колебаниями конца проволоки сварщик проплавляет поверхность торца нижнего стержня. Далее по мере плавления конец проволоки направляют под разделку верхнего стержня и на торец нижнего при поперечных колебаниях конца проволоки (рис. 158, б). Когда уровень шлаковой ванны поднимается на 20—30 мм над торцом нижнего стержня, проволоку направляют под разделку верхнего стержня. Завершают процесс полукруговыми движениями проволоки у верхнего стержня (рис. 158, в). По мере подъема уровня шлаковой ванны постепенно поднимают передний подвижной элемент формы. Расстояние между верхней кромкой подвижного элемента и уровнем шлаковой ванны выдерживают 8—10 мм. В процессе сварки изменяют напряжение после полного проплавления торца нижнего стержня и за 30—40 с до завершения процесса. Режимы сварки вертикальных стержней выдерживают, как для горизонтальных



стержней. Сварку вертикальных стержней в стальных формах, песчано-керамических или с применением фосфатных связующих материалов выполняют на пониженных режимах.

Полуавтоматическую сварку порошковой проволокой используют для выполнения стыковых соединений стержней

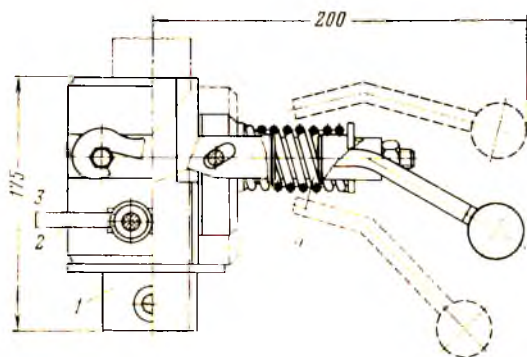


Рис. 157. СХЕМА УСТАНОВКИ ИНВЕНТАРНОЙ ФОРМЫ ДЛЯ СВАРКИ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТЕРЖНЕЙ БЕЗ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРИЛИВА:

1 — поддерживающий упор; 2 — струбцина; 3 — медная форма; 4 — прижимное устройство

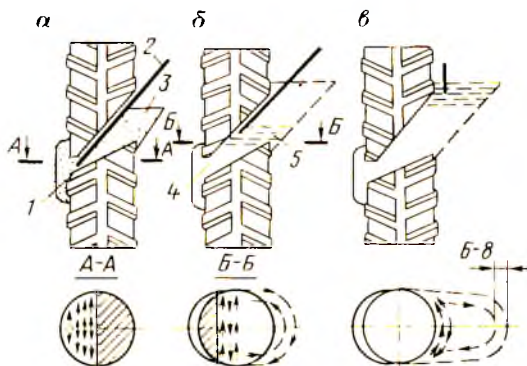


Рис. 158. СХЕМА ДВИЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОДНОЙ ПРОВОЛОКИ ПРИ СВАРКЕ ВЕРТИКАЛЬНЫХ СТЕРЖНЕЙ СО СКОСОМ НИЖНЕГО ТОРЦА СТЕРЖНЯ ОТ СВАРЩИКА:

а — в момент возбуждения дуги; б — в процессе заполнения разделки; в — при окончании процесса; 1 — место возбуждения дуги; 2 — электродная проволока; 3 — флюс; 4 — направленный металл; 5 — шлак

в инвентарных формах на стальных желобчатых накладках, а также протяженными швами для соединения элементов стержневой арматуры и накладных деталей. Конструкции медных форм, используемых при сварке порошковой проволокой, практически не отличаются от конструкций форм, применяемых для полуавтоматической сварки под флюсом. При сварке вертикальных стержней диаметром менее 32 мм на ближней

к сварщику трети торца нижнего стержня осуществляют колебательные поперечные движения, перемещая проволоку по направлению к сварщику. Затем, не прерывая процесса, такими же колебательными движениями перемещают проволоку по направлению от сварщика, проплавляя торец стержня по всей площади. Постепенно заполняя плавильное пространство, чередуют колебательные и круговые движения. В конце процесса во избежание перегрева металла сварку периодически прерывают и заканчивают быстрыми колебаниями конца проволоки у края медной формы с резким обрывом дуги. При сварке стержней диаметром более 32 мм дугу возбуждают в центральном сечении торца нижнего стержня и перемещают проволоку по направлению от сварщика, проплавляя торец стержня по всей площади и коренную часть стыка. После тщательной проварки корня шва продолжают процесс по рассмотренной технологии. Техника сварки горизонтальных стержней порошковой проволокой ПП-АНЗ незначительно отличается от процесса сварки сплошной проволокой под флюсом:

|                                |         |         |
|--------------------------------|---------|---------|
| Диаметр стержней, мм . . . . . | 25—28   | 32—40   |
| Сварочный ток, А . . . . .     | 250—300 | 350—400 |
| Напряжение дуги, В . . . . .   | 25—26   | 26—30   |
| Вылет электрода, мм . . . . .  | 30—40   | 40—50   |
| Время сварки, мин . . . . .    | 2,5—3,5 | 4—5,5   |

Для сварки арматуры применяют также порошковые проволоки ПП-2ДСК, СП-2, ПП-АН7.

Сварку стыковых соединений стержней диаметром 25—36 и 40 мм на стальных желобчатых подкладках используют для стали классов А-II и А-III, выполняя проволоками ПП-АНЗ и ПП-АН7. Особенность сварки заключается в удалении шлака в процессе сварки. Для этого при сварке проволокой ПП-АНЗ в накладках прожигают отверстие изнутри, а при сварке проволокой ПП-АН7 — снаружи. Для сварки вертикальных стержней угол разделки верхнего стержня выполняют не менее 55° и 70—75° к горизонтальной плоскости.

Ванную сварку под флюсом и порошковой проволокой выполняют полуавтоматами ПШ-54, А-1114М, ПДШМ-500, ПДШР-500, ПДПГ-500, А-1197, А-765, А-537У. Для ванной сварки арматуры под флюсом разработан полуавтомат А-1530-УЗ, который отличается от других тем, что позволяет в процессе сварки ступенчато изменять скорость подачи электродной проволоки при помощи кнопки на держателе и избегать необходимости регулирования напряжения.

В качестве источников питания применяют для сварки под флюсом и порошковой проволокой горизонтальных стыковых стержней трансформаторы СТШ-500-80, ТСД-500, ТСМ-500, ТД-500, ТСД-1000 и преобразователи ПСГ-500, ПСУ-500. Для сварки вертикальных стержней применяют трансформаторы ТСД-500, ТСД-1000 и преобразователи ПСУ-500, ПСГ-500.

## ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКАЯ СВАРКА САМОЗАЩИТНОЙ ПРОВОЛОКОЙ

Полуавтоматическую сварку арматуры многослойными швами самозащитной проволокой (СОДГП) осуществляют проволоками 20ГСТЮА (ЭП-245) и 15СТЮЦА (ЭП-439) без дополнительной защиты наплавленного металла флюсом или газом (табл. 28). Способ СОДГП разработан в ИЭС им. Е. О. Патона и позволяет упростить аппаратуру, уменьшить ее массу, повысить гибкость технологического процесса. Процесс СОДГП применяют для заварки многослойными швами торцов стержней арматуры из сталей классов А-II и А-III, а также для сварки протяженными швами элементов закладных деталей. Стыковые соединения стержней собирают на стальных желобчатых накладках толщиной 8 мм, проводя заплавление разделки концов стыкуемых стержней и наложение фланговых швов.

Таблица 28

РЕЖИМЫ ПОЛУАВТОМАТИЧЕСКОЙ СВАРКИ САМОЗАЩИТНОЙ ПРОВОЛОКОЙ

| Диаметр<br>стержней,<br>мм | Диаметр<br>проволоки,<br>мм | Соединения стержней |                  |                     |                  |
|----------------------------|-----------------------------|---------------------|------------------|---------------------|------------------|
|                            |                             | горизонтальные      |                  | вертикальные        |                  |
|                            |                             | сварочный<br>ток, А | напряжение,<br>В | сварочный<br>ток, А | напряжение,<br>В |
| 25—40                      | 1,6<br>2                    | 240—260             | 32—34            | 180—200<br>180—220  | 25—26            |
| 50—70                      | 1,6<br>2                    | 240—280<br>240—300  | 34—36            | 200—260<br>260—280  | 26—28<br>26—30   |

Стальные желобчатые накладки закрепляют на стержнях двумя симметрично расположенными прихватками. Сварку выполняют проволокой диаметром 1,6—2 мм полуавтоматом А-1114М; для вертикально расположенных стержней применяют проволоку меньшего диаметра. При сварке горизонтальных стержней дугу зажигают на желобчатой накладке и медленно перемещают проволоку вдоль торцов свариваемых стержней, тщательно проплавливая их (рис. 159, а). Затем зигзагообразными движениями заправляют межторцовый зазор, обеспечивая наложение отдельных слоев. При сварке вертикальных стержней (рис. 159, б) дугу возбуждают в точке К, а затем перемещают проволоку зигзагообразно. После наплавки усиления накладывают фланговые швы в направлении сверху вниз. Питание электрической дуги осуществляется от выпрямителей ВС-300, ИПП-300; ВДГ-301, ВЖ-2П, ВСУ-300, ВС-500, ВС-600 и преобразователей ПСГ-350, ПСГ-500, ПСУ-500.

## СТЫКОВАЯ ЭЛЕКТРОКОНТАКТНАЯ СВАРКА АРМАТУРЫ

Арматурные стержни железобетонных конструкций соединяют в заготовительных цехах встык при помощи электроконтактной сварки сопротивлением и оплавлением. Для нагрева стержней используют тепло, выделяемое при прохождении электрического тока плотностью  $j$ , который совершает работу при удельном сопротивлении металла  $\rho_r$  и контактном сопротивле-

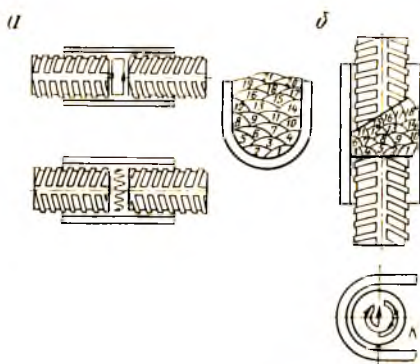


Рис. 159. СБОРКА И СВАРКА МНОГОСЛОЙНЫМИ ШВАМИ ПРИ СОДП ГОРИЗОНТАЛЬНЫХ (а) И ВЕРТИКАЛЬНЫХ (б) СОЕДИНЕНИЙ:

$1-2l$  — порядок наложения слоев стержней

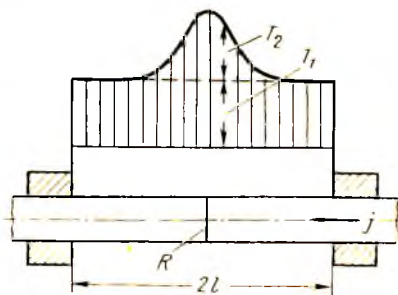


Рис. 160. РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРЫ ПО ДЛИНЕ СВАРИВАЕМЫХ СТЕРЖНЕЙ ПРИ ИХ НАГРЕВЕ ТОКОМ

нию  $R$  на границе между стержнями (рис. 160). При электроконтактной сварке сопротивлением стержни зажимают в электродных контактных колодках, к которым подводят ток от вторичной обмотки сварочного трансформатора. Первичную обмотку включают в сеть переменного тока с напряжением 220 или 380 В. Вторичная обмотка рассчитана на низкое напряжение (обычно до 16 В) и большой ток (до десятков тысяч ампер). Нагрев стержней осуществляется под током после плотного прижатия торцов друг к другу. Нагретые до температуры пластического состояния стержни сваривают под действием сжимающего усилия, создаваемого осадочным механизмом. При наличии контактного сопротивления  $R$  распределение температуры по длине нагреваемого стержня неравномерно (см. рис. 160). Температуру  $T$  можно представить как сумму двух температур:  $T = T_1 + T_2$ , где  $T_1$  — температура нагрева током бесконтактного стержня неограниченной длины;  $T_2$  — температура местного нагрева стержня приконтактным источником.

Температуру  $T_1$  можно определить из формулы

$$T_1 = \frac{e\beta v_0 t}{\beta} - \frac{1}{\beta}, \quad (46)$$

где  $v_0$  — начальная скорость нагрева,  $v_0 = j^2 (\rho_r / c\rho)_0$  (табл. 29).

Таблица 29

ЗНАЧЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ДЛЯ РАСЧЕТА НАГРЕВА СТЕРЖНЕЙ ПРИ КОНТАКТНОЙ СВАРКЕ

| Материал | $[\rho_r / (c\rho)]_0$ ,<br>$\frac{\text{см}^2 \cdot \text{градус}}{\text{А}^2 \cdot \text{с}}$ | $\beta$ , 1/градус  | $j^2 t_{\text{н}}$ , $\text{А}^2 \cdot \text{с} / \text{см}^2$ | $k$ , Дж/(А·см)        |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------|----------------------------------------------------------------|------------------------|
| Сталь 10 | $3,6 \cdot 10^{-6}$                                                                             | $3,8 \cdot 10^{-3}$ | $(89-93) \cdot 10^6$                                           | $(0,8-1) \cdot 10^6$   |
| Сталь 45 | $5,25 \cdot 10^{-6}$                                                                            | $3,0 \cdot 10^{-3}$ | $(72-75) \cdot 10^6$                                           | $(0,7-0,9) \cdot 10^6$ |

При сварке сопротивлением малоуглеродистой стали плотность тока составляет 25—60 А/мм<sup>2</sup>. Суммарное удельное количество теплоты при существовании сопротивления  $R$  выражается уравнением  $Q_2 = k/j$ , где  $k$  — расчетный коэффициент, зависящий от свойств металла и удельного давления.

Температуру местного нагрева  $T_2$  рассчитывают по схеме мгновенного плоского источника  $Q_2$  в неограниченном стержне, нагреваемом током:

$$T_2 = \frac{Q_2}{c\rho \sqrt{4\pi at}} e^{-x^2/(4at) + \beta v_0 t}.$$

Моменту достижения в стыке сварочной температуры (для стали 1250—1350 °С) соответствует определенное значение произведения  $j^2 t_{\text{н}}$  (см. табл. 29), где  $t_{\text{н}}$  — продолжительность нагрева стержней при сварке. Для осуществления сварки необходимо нагреть околошовную зону длиной  $2l_{\text{ог}}$  выше температуры пластического деформирования (для стали 500—700 °С). Несмотря на высокую пластичность стали при этой температуре, она все же обладает достаточным сопротивлением деформированию, и добиться плотного соприкосновения стыкуемых стержней по всей поверхности довольно трудно. В результате в местах отсутствия контакта происходит сильный нагрев и образование пленки окислов, что приводит к непровару. Чем больше диаметр свариваемых стержней, тем труднее обеспечить плотность прилегания торцов по всей поверхности. Лучшие результаты стыковой сварки сопротивлением получают на стержнях диаметром 10—14 мм.

Электроконтактную сварку стержневой арматуры осуществляют наиболее часто с непрерывным и прерывистым оплавлением. При сварке непрерывным оплавлением подвижные зажимы машины перемещаются с возрастающей скоростью, обес-

печивая высокий градиент температур в осевом направлении при интенсивном нагреве оплавляемых торцов. Свариваемые стержни нагреваются в основном за счет теплопроводности металла от источника в зоне контакта и в меньшей степени — теплотой Джоуля—Ленца, выделяемой при протекании тока в стержне. В процессе оплавления с равномерно возрастающей скоростью  $v = st$ , где  $s$  — ускорение, распределение температуры по оси стержней описывается эмпирической формулой

$$T = T_{\text{пл}} e^{-0,92 (s/a^2)^{\frac{1}{3}} x}, \quad (47)$$

где  $T_{\text{пл}}$  — температура плавления металла;  $x$  — расстояние от оплавляемого торца.

Для получения сварного соединения необходимо до осадки прогреть зону длиной  $2l_{\text{ос}}$  выше температуры  $T_{\text{д}} = 500 \div 700^\circ\text{C}$ . Необходимое допустимое ускорение  $s_{\text{max}}$  определяют из выражения (47) по формуле

$$s_{\text{max}} = 1,3 \frac{a^2}{l_{\text{ос}}^3} \left( \ln \frac{T_{\text{пл}}}{T_{\text{д}}} \right)^3.$$

Электроконтактную сварку непрерывным оплавлением чаще применяют для соединения стержней сравнительно небольшого диаметра из незакаливающихся сталей. Арматурные стержни из сталей Ст5, 25Г2С, 35ГС, 18Г2С и особенно 30Х2С наиболее целесообразно сваривать встык прерывистым оплавлением, создающим дополнительный подогрев стыка. Сварка стержней арматуры оплавлением с подогревом является основным способом выполнения стыковых соединений. Применение подогрева предупреждает резкую закалку и появление крупнозернистых структур в металле околостыковой зоны стыка при сварке стержней из среднеуглеродистой и низколегированной арматурных сталей. Подогрев чаще осуществляют прерывистым оплавлением, обеспечивая его периодическим сближением и разведением свариваемых стержней с длительностью импульсов оплавления 0,3—1,5 с, а число их колеблется от 3 до 20. Применение подогрева создает возможность сварки стержней большого диаметра и способствует уменьшению в 2—3 раза (по сравнению со сваркой непрерывным оплавлением) мощности машин.

При расчете распределения температуры по длине свариваемых стержней прерывистый подогрев током можно рассматривать как непрерывный подогрев в течение общего времени  $t_{\text{н}}$  током меньшей плотности

$$j_{\text{эф}} = j \sqrt{\Sigma t_{\text{в}} / t_{\text{н}}}, \quad (48)$$

где  $\Sigma t_{\text{в}}$  — суммарная длительность периодов включения тока плотностью  $j$ . Во время подогрева плотность тока составляет  $10 \div 40 \text{ А/мм}^2$ .



Величину  $T_1$  при сварке с подогревом находят по формуле (46) с заменой  $j$  на  $j_{эф}$  в соответствии с выражением (48). Температуру  $T_2$  определяют по схеме непрерывно действующего в течение  $t_n$  неподвижного источника теплоты в бесконечном стержне с учетом дополнительного тепловыделения от проходящего тока. Мощность источника теплоты  $q_2 = U_K j_{эф}$ , где  $U_K \approx 0,4 \div 0,6$  В.

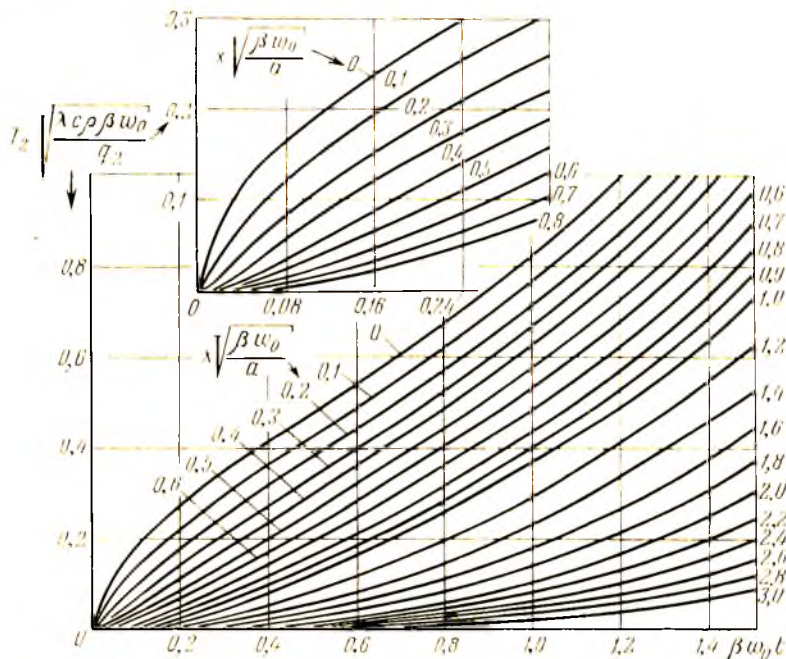


Рис. 161. НОМОГРАММА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРЫ  $T_2$  ЧЕРЕЗ БЕЗРАЗМЕРНЫЕ ТЕМПЕРАТУРЫ, ВРЕМЯ И РАССТОЯНИЕ

Большие значения вторичного напряжения  $U_K$  соответствуют малым скоростям движения зажимов машины и большим диаметром свариваемых стержней.

Температура

$$T_2 = \frac{q_2}{c\rho\sqrt{4\pi a}} \int_0^{t_n} e^{-\frac{x^2}{4at} + \beta\omega_0 t} \frac{dt}{\sqrt{t}}.$$

Численное значение  $T_2$  находят по номограмме (рис. 161) через безразмерные параметры температуры, расстояния и времени. Процесс оплавления после прерывистого подогрева обычно непродолжителен и осуществляется при меньших токах. Поэтому приближенно можно считать, что к концу процесса оплавления сохраняется распределение температур, полу-

чаемое к концу подогрева, но температура торца соответствует температуре плавления металла.

Сварка оплавлением дает хорошие результаты при соединении стержней из однородных и разнородных сталей. Для сварки используют стержни гладкие, периодического профиля, квадратные, а также одинакового и разного сечений. Сварка стержней различного диаметра на контактных стыковых машинах допускается при разности в диаметрах не более 15 %, а стержней квадратного сечения — не более 10 %. При большей разнице в сечениях стержней используют вставку длиной, равной четырем ее диаметрам, но не менее 200 мм. Параметры режима контактной стыковой сварки стержней арматуры ориентировочно определяют следующим образом: устанавливают площадь сечения стержней; выбирают удельную мощность сварочной машины; для стержней сплошного сечения удельная мощность 0,05—0,25 кВА/мм<sup>2</sup>; определяют необходимую мощность машины (умножая удельную мощность на площадь сечения свариваемых стержней); корректируют мощность машины, добываясь плотности тока в процессе оплавления 6—25 А/мм<sup>2</sup> и необходимой длительности сварки.

Для нормального процесса непрерывного оплавления между током  $I$ , скоростью оплавления  $v$  и диаметром свариваемых деталей  $d$  выдерживается следующее соотношение:

$$I = \sqrt{d^3(3v+1)\sqrt{v}}$$
 При подогреве условия считаются оптимальными в том случае, когда на оплавление затрачивается 20—40 % общего времени подогрева.

Для соединения арматурных стержней среднего диаметра применяют стандартные контактные машины, имеющие станину со встроенным сварочным трансформатором, устройство для установки и крепления стержней, а также для токоподвода, механизм подачи и сжатия (устанавливаемые на станине) и пускорегулирующие устройства, которые размещаются внутри станины в отдельном шкафу управления. В контактных машинах перемещение и сжатие стержней может осуществляться следующими приводами: рычажным, пружинным, электрическим, пневматическим, пневмогидравлическим или комбинированным. Машины с рычажным приводом используют для сварки стержней диаметром до 36 мм, что связано с обеспечением приводом незначительного усилия сжатия до 30—35 кН.

Для сварки стержней арматуры применяют электроконтактные машины с рычажным приводом мощностью 25—100 кВА: МРС-25 (номинальная мощность 25 кВА), МСР-50, МСР-75, МСР-100 и машины более поздних выпусков: МС-801-2, МС-1202 и МС-1602. Они предназначены для сварки непрерывным оплавлением и оплавлением с подогревом, но могут быть использованы и для сварки сопротивлением. Машины МСР-25 и МС-804-2 наряду с рычажным имеют пружинный привод по-

дачи, облегчающий выполнение сварки сопротивлением. Машинны МСР-50, МСР-75 и МСР-100 снабжены рычажно-винтовыми зажимами стержней арматуры, а машины МСР-25, МС-1202 и МС-1602 — эксцентриковыми. Машины МС-1202 и МС-1602 позволяют сваривать непрерывным оплавлением арматуру из низколегированной стали сечением соответственно до 300 и 600 мм<sup>2</sup>, а оплавлением с подогревом — до 700 и 1400 мм<sup>2</sup>. Для автоматической сварки оплавлением арматуры среднего сечения применяют машины МСМУ-150, МС-1604 и др. Машина МСМУ-150 имеет кулачковый электропровод подачи, пневматические зажимы арматуры и позволяет сваривать непрерывным оплавлением стержни сечением соответственно 600 и 1000 мм<sup>2</sup>. Машину МС-1604 используют для сварки непрерывным оплавлением и оплавлением с подогревом арматуры из углеродистой и легированной стали сечением до 1500 мм<sup>2</sup>. Для сварки оплавлением с подогревом арматуры большого сечения применяют машины МСГА-300, МСГА-500, РСМ-320У и др.

При сварке оплавлением стержней арматуры из высокопрочной и низколегированной стали класса А-IV (марка 30ХГ2С) получить высокое качество соединения труднее, чем при сварке стержней из стали классов А-I, А-II, А-III, что связано со склонностью стали 30ХГ2С к закалке и перегреву.

Во время сварки стержней периодического профиля между контактными колодками и поверхностью изделий могут возникнуть поджоги из-за недостаточного контакта, что приводит к закалке и получению низких пластических свойств. Металл зоны термического влияния закаливается, и разрушение соединения происходит вблизи стыка. Для обеспечения высокого качества сварных соединений из высокопрочной стали стержни сваривают в контактных колодках достаточной длины с полукруглыми выемками. Ток подводят ко всем четырем контактными колодкам.

### **ЭЛЕКТРОКОНТАКТНАЯ СВАРКА ПЕРЕСЕКАЮЩИХСЯ СТЕРЖНЕЙ**

Соединение пересекающихся стержней арматуры, сеток и других изделий наиболее рационально осуществлять в заводских и монтажных условиях с помощью точечной электроконтактной сварки. Обычно для этой цели чаще применяют арматурные стержни или проволоку диаметром до 25 мм, хотя качественные соединения могут быть получены с использованием стержней большего диаметра.

Процесс контактной сварки пересекающихся стержней состоит из трех последовательных операций: сжатия изделия между торцами электродов; нагрева узла током до сварочной температуры под давлением электродов; охлаждения узла при выключенном токе в обжатии стержней.

Контактную точечную сварку в заготовительных цехах можно выполнять различными машинами в зависимости от степени механизации изготовления арматурных изделий. В этом случае для сварки можно применять стандартные одноточечные машины, специальные одноточечные и многоточечные машины, многоэлектродные полуавтоматы и автоматы.

Для изготовления арматурных сеток и каркасов непосредственно на строительных площадках и в мелкосерийном производстве используют стандартные контактные машины. Сварку пересекающихся стержней небольших диаметров на строительных площадках осуществляют на машинах с педально-пружинным и моторно-пружинным механизмами сжатия электродов, а изготовление отдельных партий арматурных сеток и каркасов в заготовительных цехах производится стационарными машинами с пневматическими устройствами сжатия электродов и подвесными машинами с клещами, приводимыми в действие пневмогидравлическими и пневматическими устройствами. На строительных предприятиях широко применяют стандартные машины автоматического действия МТ-1207, МТ-1210, МТ-1217, МТ-1607, МТ-1610, МТ-2507, МТ-4001, МТ-150/1200 и др. Эти машины используют для сварки плоских сеток, каркасов и закладных деталей. Сварку широких сеток осуществляют обычно с помощью подвесных машин МТПГ-150-2, МТП-1203 вместе с клещами КТГ-12-2-4, КТГ-12-2-1, а также с клещами КТ-601, КТ-801 и др. Арматурные сетки в цехе сваривают многоэлектродными машинами ЛТМС-14×75-7-1, МТМО-10×35, МТМ-32. Эти машины предназначены для изготовления арматурных сеток шириной 800—3800 мм из стержней диаметром 3—32 мм. Работа машины построена по шаговому принципу: в период сварки изделие неподвижно, перемещение его на очередной шаг осуществляется после окончания процесса сварки. Процесс сварки занимает в этих машинах около 10 % времени от общего цикла соединения стержней. Для точечной сварки арматурных каркасов используют машины МТ-603, МТМ-09, МТМ-33, МТМК-3×100 и МТМ-35.

---

## *Глава 16*

### **КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ**

Высокое качество сварочных работ на строительно-монтажных участках обеспечивается хорошей организацией работ и контролем сварочного производства. Под контролем качества сварки подразумевается проверка условий и порядок выполнения сварочных работ, а также определение качества выполненных сварных соединений в соответствии с техническими требо-

ваниями. Контроль, проводимый на всех этапах строительства, распространяется на следующее: проверку состояния и качества материалов, подлежащих сварке; организацию хранения и выдачи сварочных материалов (электродов, сварочной проволоки, флюсов и др.) сварщикам; подготовку конструкций под сварку с соблюдением требуемой формы разделки кромок, их чистоты, качества сборки и т. п.; соблюдение последовательности, чередования сборочных и сварочных операций в соответствии с технологической документацией; соблюдение установленных режимов сварки и порядка наложения швов; использование электросварщиков требуемой квалификации; качество и своевременность выполнения сопутствующих и последующих операций (послойная очистка, подогрев, термическая обработка и т. д.); соответствие установленным требованиям внешних условий выполнения сварочных работ (температура окружающего воздуха и свариваемого металла, отсутствие сквозняка, влаги и т. п.); исправность электросварочного оборудования и применяемой оснастки и т. д.

Контроль процесса изготовления сварных конструкций осуществляется пооперационно, и правильная организация его является надежной гарантией безаварийной эксплуатации трубопроводов, резервуаров и других конструкций.

Качество сварных соединений трубопроводов и конструкций проверяют во время монтажа и по окончании сварки. Сварные швы подвергают внешнему осмотру для определения поверхностных трещин в наплавленном металле или околошовной зоне, наплывов и подрезов в местах перехода от шва к основному металлу, прожогов, незаваренных кратеров и других дефектов. В процессе монтажа выборочно определяют механические свойства металла шва и сварного соединения на образцах, вырезанных из отдельных участков шва. При контроле стыков трубопроводов и резервуаров наибольшее распространение получили механические испытания вырезанных из стыков образцов на статическое растяжение, статический изгиб, ударный изгиб и измерение твердости различных участков соединения.

Для выявления возможных дефектов внутри сварного соединения (скрытых трещин, непроваров, шлаковых включений, газовых пор и других дефектов) применяют физические методы контроля, при которых качество сварки определяют без разрушения соединения. Наиболее часто применяют следующие методы физического контроля сварных стыков: магнитографический, рентгено- и гаммаграфирование, ультразвуковой контроль.

## **КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА МАТЕРИАЛОВ**

Материалы (трубы, листы, электроды, проволока, флюс и др.), поставляемые на строительные участки, подвергаются контролю в соответствии с требованиями технических условий.



Трубы, поставляемые на трассу, снабжены документацией (сертификатами), которые выдает отдел технического контроля завода-поставщика. Трубы без сертификатов для сооружения трубопроводов не применяют до тех пор, пока для каждой трубы определяют химический состав и механические свойства и составят документ, заменяющий сертификат. По окончании строительства документацию на трубы и все применяемые сварочные материалы хранят в управлении эксплуатации трубопровода.

Электроды также снабжают сертификатом, в котором указаны завод-изготовитель, дата изготовления, номер и масса партии, ГОСТ на электроды, диаметр, тип и марка электродов, механические свойства наплавленного металла и допустимое в нем содержание серы и фосфата, рекомендуемые режимы сварки, режим просушки электродов. При внешнем осмотре покрытие электродов должно быть прочным без пор и трещин, вздутий и комков неразмешанных компонентов. Допускают следующие дефекты покрытия: поры — не более трех на длине 100 мм диаметром до 2 мм, глубиной до  $\frac{1}{2}$  толщины покрытия; поверхностные риски, шероховатость и задиры — глубиной не более  $\frac{1}{4}$  толщины покрытия; не более двух трещин длиной до 12 мм каждая; не более трех местных вмятин глубиной до  $\frac{1}{2}$  толщины покрытия и длиной до 12 мм каждая. Технологические свойства новой партии электродов проверяют на месте монтажных работ путем тщательного наблюдения за процессом сварки и качеством получаемого шва. Электроды при этом испытании должны обеспечивать легкое зажигание дуги и равномерное горение без чрезмерного разбрызгивания металла и шлака. Покрытие должно плавиться без отклонения и образования «чехла» или «козырька», которые препятствуют непрерывному плавлению.

Проволока для полуавтоматической и автоматической сварки под флюсом или для сварки в среде защитных газов, а также порошковая и легированная проволока должны иметь на каждой бухте (мотке) металлическую бирку, в которой указаны завод-изготовитель, номер плавки, марка или условное обозначение проволоки по стандарту. Проволока не должна быть загрязненной, смазанной или заржавленной. Для защиты от коррозии ее покрывают слоем меди или раствором нитрида натрия. На каждую партию проволоки дается сертификат, где кроме обычных сведений указаны диаметр проволоки и результаты ее химического анализа. Если сертификат отсутствует, то проволоку испытывают в соответствии с требованиями стандарта.

Флюсы для автоматической сварки снабжают документами, где подтверждается их марка и качество. При контроле флюса проверяют его гранулометрический состав и влажность, которая должна быть не более 0,1 %. При большей влажности флюсы прокаливают при температуре 250—500 °С с выдержкой до



2 ч. Наличие влаги проверяют взвешиванием флюса после сушки до постоянного веса.

Защитные газы, поступающие на монтажные площадки (аргон, углекислый газ), имеют сертификат завода-изготовителя. Углекислый газ должен иметь чистоту не менее 98,5 % и содержать влаги не более 0,1 %. Проверку качества газов проводят при обнаружении в швах пор, трещин и других недопустимых дефектов.

### ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Механические испытания сварных соединений из труб обычно проводят на образцах, вырезанных из отдельных участков стыка (рис. 162). Эти испытания требуют разрушения

Рис. 162. СХЕМА ВЫРЕЗКИ ОБРАЗЦОВ ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ НА РАСТЯЖЕНИЕ (1), НА ИЗГИБ КОРНЕМ ШВА НАРУЖУ (2), НА ИЗГИБ КОРНЕМ ШВА ВНУТРИ (3) ДЛЯ ТРУБ ДИАМЕТРОМ ДО 400 ММ (а), ОТ 400 ДО 1000 ММ (б) И БОЛЕЕ 1000 ММ (в)



образцов и поэтому осуществляются выборочно. Подобные испытания используют в следующих случаях: для контроля качества новых сварочных материалов (электродов, проволоки и флюса); для проверки квалификации сварщиков; для выборочной проверки механических свойств сварных соединений при изменении диаметров труб под сварку (переход от одной группы диаметров к другой). Механические испытания сварных соединений и металла швов проводят на образцах, вырезанных из пилки трубопровода или из пробных стыков, сваренных из коротких отрезков труб в условиях, аналогичных трассовым. Из каждого стыка изготовляют от шести до двенадцати образцов. Вырезанные образцы подвергаются механической обработке для получения определенной формы и размеров (рис. 163). При испытании на растяжение определяют прочность металла шва или сварного соединения. На рис. 163, а изображены образцы для определения временного сопротивления наиболее слабого участка в стыковом соединении. Испытания на изгиб стыкового соединения состоят в загибе образца сосредоточенной силой вокруг скругленной оправки (рис. 163, б). Угол изгиба определяют при образовании первой трещины в растянутой зоне. Образцы испытывают в стационарных или передвижных лабораториях. Для получения оперативных данных в трассовых условиях применяют передвижные лаборатории марки ЛКС, которые устанавливают на прицепе. В комплекте оборудования

лаборатории имеется фрезерный станок марки НГФ-110Ш1 и разрывная машина марки РМ-50 для механического испытания образцов на растяжение и изгиб. Для определения ударной вязкости металла шва, околошовной зоны или наплавленного металла (рис. 163, з) испытания проводят в стационарных лабораториях на образцах сечением не более  $10 \times 10$  мм. В зависимости от цели испытания при выборе положения образца в испытываемом соединении вершину надреза располагают в раз-

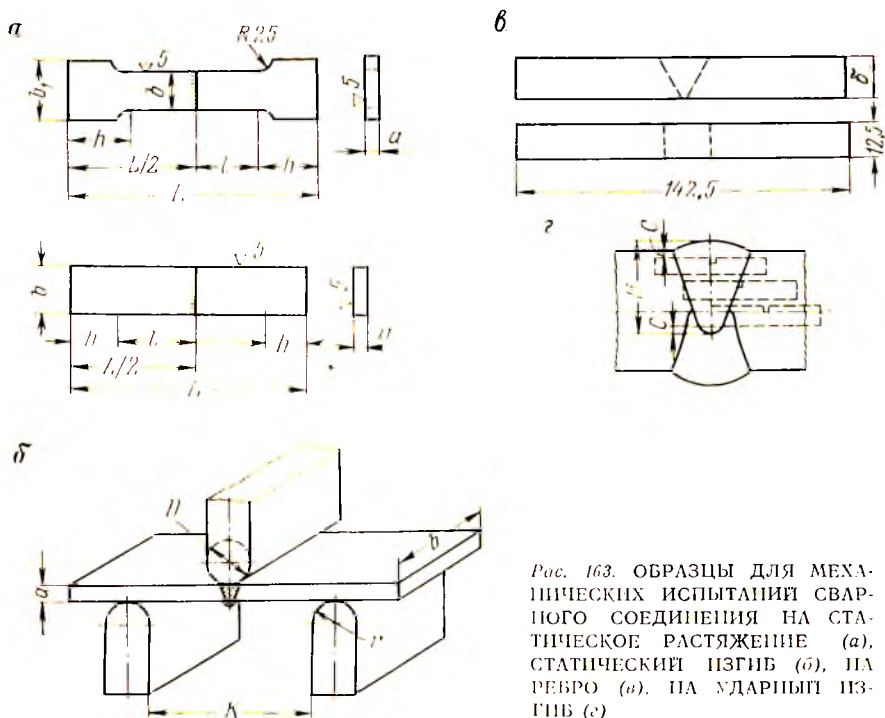


Рис. 163. ОБРАЗЦЫ ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ НА СТАТИЧЕСКОЕ РАСТЯЖЕНИЕ (а), СТАТИЧЕСКИЙ ИЗГИБ (б), НА РЕБРО (в), НА УДАРНЫЙ ИЗГИБ (г)

ных точках шва. Требуемое положение образца устанавливают по макрошлифу поперечного сечения сварного соединения. При этом все образцы располагают поперек продольной оси шва. Твердость различных участков сварного соединения определяют в поперечном сечении на макрошлифах замером на приборах Виккерса, Роквелла и Бринелля. Перед началом сварочных работ на резервуарах сварщики выполняют сварку контрольных образцов. Образцы для механических испытаний готовят из пластин, сталь которых соответствует стали стенки резервуара. При сварке резервуара листовым методом каждый сварщик вручную должен сварить в вертикальном и горизонтальном положении по одному стыковому соединению из пластин (рис. 164, а). В этом случае готовят образцы толщиной

25 мм из стали 09Г2С или 16Г2АФ толщиной 17 мм. Сварка пластин ведется в той последовательности, которая будет соблюдаться при выполнении работ на корпусе резервуара. При применении полуавтоматической сварки для сооружения резервуара каждый сварщик должен сварить пластины внахлестку из стали, используемой на днище. Нахлесточные сварные соединения испытывают на плотность вакуумным методом и керосином (рис. 164, б). Для сварщиков, выполняющих горизонтальные стыки стенки резервуара автоматической установкой «Циркоматик», устанавливают образцы из пластин длиной

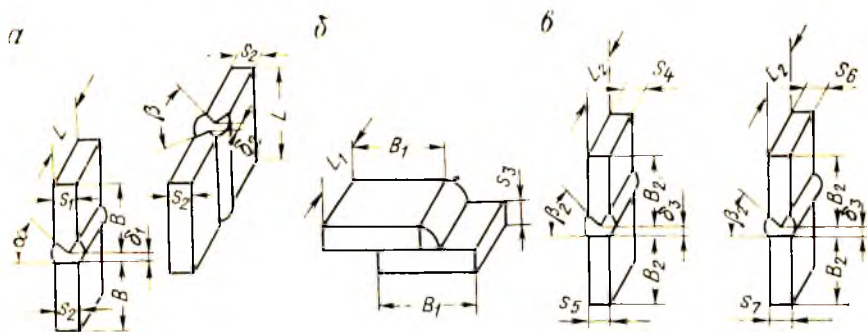


Рис. 164. ОБРАЗЦЫ ДЛЯ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ ПРИ СВАРКЕ РЕЗЕРВУАРОВ:

а — ручная сварка:  $L=300$  мм,  $B=130$  мм,  $s_1=22$  мм,  $s_2=25$  мм,  $\alpha=50\pm 5^\circ$ ,  $\beta=27\pm 3^\circ$ ,  $\delta_1=4\pm 1$  мм,  $\delta_2=4\pm 1$  мм; б — полуавтоматическая сварка порошковой проволокой:  $L_1=700$  мм,  $B_1=300$  мм,  $s_3=5$  мм; в — автоматическая сварка с полупринудительным формированием шва:  $L_2=1000$  мм,  $B_2=200$  мм,  $s_4=22$  мм,  $s_5=25$  мм,  $\beta_2=45\pm 3^\circ$ ,  $s_6=9$  мм,  $s_7=10$  мм,  $\delta_3=0\pm 2$  мм

1000 мм (рис. 164, в). Эти образцы сваривают на стенде с соблюдением режимов, которые будут характерны при сварке резервуаров. С введением новых автоматических процессов сварки (сварка с принудительным формированием шва вертикальных стыков стенки резервуара) операторы перед монтажом выполняют дополнительные образцы с соблюдением всех требований, которые предъявляются к этим стыковым соединениям в соответствии с разработанной инструкцией.

Из каждого выполненного ручной и автоматической сваркой стыкового соединения вырезают два образца для испытания на растяжение и два для испытания на изгиб. При сварке сферических резервуаров перед началом работ сваривают контрольную пластину по технологии и на режимах, предусмотренных работами, и в тех же пространственных положениях шва. Из пластины вырезают образцы и испытывают на растяжение и изгиб и на ударную вязкость. На растяжение и изгиб испытывают по два образца при температуре  $20^\circ\text{C}$ . Ударную вязкость проверяют на четырех образцах, если толщина стенки резервуара больше 12 мм, а рабочая температура ниже  $-20^\circ\text{C}$ .

Дефекты в сварных соединениях трубопроводов и других конструкций встречаются при нарушении технологии сварки, при неправильном выборе сварочных материалов и неудовлетворительном их хранении, при неудачном выборе способа сварки и режима, при неудовлетворительной подготовке изделий под сварку и т. п. Дефекты, образующиеся в сварных соединениях, можно разделить на несколько групп: металлургические пороки (расслоения, трещины и т. д.) в металле изделия, расположенные рядом со швом, способствуют проявлению их под действием нагрева и сварочных напряжений; дефекты, обусловленные плохой свариваемостью металла применяемых конструкций; дефекты, связанные с техническим состоянием сварочных материалов; дефекты, вызванные нарушением сварочного процесса; дефекты, образующиеся при эксплуатации трубопроводов и конструкций, связанные с появлением усталостных трещин в стыках или коррозионными повреждениями под действием агрессивных сред.

По расположению в стыке дефекты различаются на наружные и внутренние. К наружным дефектам следует отнести следующие: несоответствие размеров швов требованию технических условий (размеры сечения швов завышены или занижены); неравномерность размеров сечений швов по их длине, характеризующаяся неравномерной шириной, крупной чешуйчатостью, наличием наплывов и сосулек; смещение кромок и продольной оси швов от их теоретического положения; пропуски на некоторых участках при непрерывных швах; наличие незаваренных кратеров; подрезы в основном металле рядом со швом; сквозные прожоги; наружные трещины, поры и свищи; протекли от наплавленного металла с обратной стороны швов; непровары на односторонних швах, наблюдаемые с обратной стороны стыка. Дефекты геометрической формы, имеющие ослабление или излишнее усиление сварных швов, являются следствием нарушения режима сварки. Неудовлетворительное формирование шва, имеющего крупную чешуйчатость, и неравномерная ширина швов при сварке трубопроводов наиболее часто наблюдаются в неповоротных стыках, что связано с нарушением режима сварки или с недостаточной квалификацией сварщика. Пропуски при сварке непрерывных швов, незаваренные кратеры, прожоги, наружные трещины вообще недопустимы для любых конструкций, и их необходимо немедленно устранять при обнаружении.

Внутренние дефекты выявляют в сварном соединении с помощью различных физических методов контроля. К внутренним дефектам должны быть отнесены (рис. 165): газовые поры, которые могут быть одиночные, групповые, располагаются в шве в виде скоплений или цепочек; шлаковые включения различ-

ных размеров, которые могут располагаться в корне шва, внутри наплавленного металла и между слоями при многослойной сварке; непровар в корне шва и между слоями; трещины любых форм и размеров; несплавления наплавленного металла с основным. Газовые поры образуются в сварных швах из-за применения влажных электродов, флюса, защитной газовой среды и наличия влаги на поверхности свариваемых поверхностей. Шлаковые включения образуются при попадании в сварочную ванну неметаллических частиц (загрязнений, толстого

Рис. 165. ВНУТРЕННИЕ ДЕФЕКТЫ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ:

*a* — поры; *б* — неметаллические и шлаковые включения; *в* — несплавление; *г* — непровар; *д* — трещины

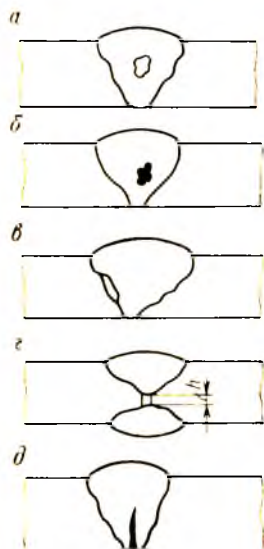
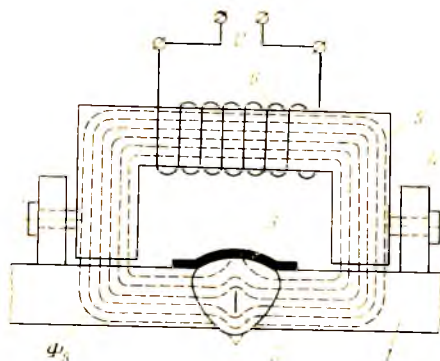


Рис. 166. СХЕМА СОЗДАНИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ КОНТРОЛЕ СВАРНОГО ШВА:

1 — металл трубы; 2 — дефект в шве; 3 — магнитная лента; 4 — опорные ролики; 5 — магнитопровод; 6 — обмотка;  $\Phi_0$  — магнитный поток



налета ржавчины или шлака при многослойной сварке), которые не успевают всплыть на поверхность шва. Непровар в корне первого шва является наиболее распространенным и опасным дефектом в сварных конструкциях, приводящий часто к разрушению всего стыка. Трещины в сварных соединениях любых конструкций являются самыми опасными дефектами, которые имеют весьма малую ширину и острые края, что затрудняет их выявление. Трещины вызывают местную концентрацию напряжения и при неблагоприятных условиях работы конструкции могут привести к нарушению герметичности и разрушению стыков.

### МАГНИТОГРАФИЧЕСКИЙ КОНТРОЛЬ

Магнитографический метод контроля качества сварных соединений является одной из разновидностей магнитной дефектоскопии и основан на обнаружении полей рассеяния, возни-



кающих в местах дефектов при намагничивании контролируемых изделий. Магнитные силовые линии распространяются в контролируемом шве без изменения направления, если в нем отсутствуют дефекты. При наличии дефектов в сварном соединении магнитные силовые линии отклоняются и возникает поле рассеяния, которое выходит на поверхности шва и фиксируется на магнитной ленте, уложенной на поверхности стыка (рис. 166). С помощью магнитографического контроля можно выявить всевозможные дефекты в сварных стыковых швах, выполненных автоматической сваркой под флюсом и в среде углекислого газа при толщине основного металла 2—25 мм. Наиболее хорошо выявляются продольные микротрещины, непровары, цепочки и скопления шлаковых включений и газовых пор. Магнитографический метод состоит из двух последовательно осуществляемых операций: намагничивания изделий специальным устройством, при котором поля дефектов «записываются» на магнитную ленту; воспроизведения или считывания «записи» с ленты, осуществляемого с помощью магнитографических дефектоскопов. Процесс намагничивания контролируемых стыков трубопроводов осуществляется с помощью специальных намагничивающих устройств, к которым относятся подвижные устройства, перемещаемые снаружи по периметру намагничивающего стыка; неподвижно установленные устройства, охватывающие весь периметр контролируемого стыка снаружи и внутри трубы.

Наибольшее распространение получили подвижные намагничивающие устройства ПНУ, которые создают однородный магнитный поток от двух стальных полюсов. Эти полюса скреплены между собой стальными перемычками (сердечниками), на которых устанавливают одну или две катушки для намагничивания стыка. Стальной каркас электромагнита опирается на четыре колеса из немагнитного материала. Колеса устанавливают таким образом, что между полюсами магнита и контролируемым изделием имеется воздушный зазор 3—4 мм. Подвижные намагничивающие устройства выпускают различных моделей в зависимости от толщины стенки контролируемого изделия и его диаметра. Их применяют для труб диаметром 100—1020 мм с толщиной стенки 16 мм. Для труб диаметром менее 100 мм применяют намагничивающие клещи, намагничивающие вилки и другие устройства. Намагничивающее устройство подключают к источникам постоянного тока и на полюсах магнита возникает магнитный поток, который пересекает контролируемый шов. Для контроля стыков трубопроводов диаметром 1220—1420 мм с толщиной стенки до 20 мм применяют намагничивающее устройство с шаговым перемещением по стыку МУН-1. Это устройство снабжено пультом дистанционного управления и само перемещается по стыку. В комплекте устройства есть набор сменных полюсных башмаков для контроля сварных швов трубопроводов различных диаметров.



Во ВНИИСТе разработана и испытана внутритрубная передвижная установка УМД-142 с кольцевым многозвенным электромагнитом для намагничивания стыков труб диаметром 1420 мм с толщиной стенки до 25 мм. Эта установка может быть использована на механизированных трубосварочных базах. Для контроля стыков на трассе разработана передвижная магнитографическая лаборатория ЛПМ-К с механизированным кольцевым намагничивающим устройством, охватывающим весь периметр сварного стыка снаружи. Лаборатория установлена на базе гусеничного трелевочного трактора ТДТ-55А. Кольцевое намагничивающее устройство челюстного типа смонтировано на стреле трактора. Конструкция намагничивающего устройства такова, что при замене подвижных элементов — челюстей — лаборатория может контролировать стыки труб разного диаметра.

Источниками питания для магнитографической и другой дефектоскопической аппаратуры служат переносные станции питания СПП-1 и СПА-1. Намагничивающие устройства можно подключать также через реостат к передвижным сварочным агрегатам. В зависимости от толщины контролируемого изделия для намагничивающих устройств ПНУ и МНУ-1 устанавливают ток 5—40 А. Для магнитографического контроля применяют магнитные ленты на триацетатной основе МК-1 и лавсановой основе МК-2 шириной 35—70 мм. Запись с магнитной ленты воспроизводят на магнитографических дефектоскопах. Ленту устанавливают в протягивающее устройство, и с помощью электромотора она постепенно перемещается. На экране электронно-лучевой трубки появляются визуальное изображение неподвижных импульсов в виде характерных кривых и изображение поперечного разреза шва в натуральную величину с обнаруженными дефектами. По изображению шва определяют конфигурацию дефектов в сварном соединении, а по амплитуде и форме импульсов — глубину дефектов. Магнитографический дефектоскоп настраивают по эталонным лентам, которые записаны с контрольных образцов сварных соединений. В качестве контрольных образцов используют стыки, вырезанные из трубопровода или специально сваренные для этой цели, шириной 300—500 мм. Контрольные стыки изготовляют из труб той же марки и толщины, что и будущие проверяемые стыки. В контрольных образцах создают естественные или искусственные дефекты, которые выявляются просвечиванием рентгеновскими или гамма-лучами.

Для магнитографического контроля применяют дефектоскопы МДУ-2У, МГК-1, МД-11Г и МД-30Г, у которых магнитограмма сварного шва воспроизводится на экране электронно-лучевой трубки. В дефектоскопе МД-20Г результаты контроля регистрируются на электрохимической бумажной ленте. Считывать и воспроизводить на экране поля рассеяния дефектов, записанных на магнитной ленте, позволяет устройство УВ-30Г.

## КОНТРОЛЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ РЕНТГЕНОВСКИМ ИЗЛУЧЕНИЕМ

Рентгено- и гаммаграфирование — наиболее распространенный метод контроля сварных соединений. Этот метод основан на способности рентгеновских и гамма-лучей проходить через сварные соединения, как через полупрозрачные тела, с регистрацией дефектов на радиографическую пленку. Под действием излучения на пленке образуется скрытое изображение, которое становится видимым после фотообработки в проявителе и закрепителе. Для сокращения времени просвечивания и обеспечения лучшей выявляемости дефектов используют флюоресцентные и металлические экраны. Рентгеновские лучи являются разновидностью электромагнитных колебаний и имеют длины волн  $6 \cdot 10^{-13} - 10^{-9}$  м с частотой излучения  $0,5 \cdot 10^{21} - 3 \cdot 10^{17}$  Гц. Источником получения рентгеновских лучей является рентгеновская трубка, которая имеет баллон с двумя электродами — анодом и катодом. Рентгеновское излучение генерируется при торможении электронов на аноде, испускаемых катодом. Кинетическая энергия электрона у поверхности анода  $E = eU$ , где  $e$  — заряд электрона ( $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  Кл);  $U$  — анодное напряжение трубки. Так как скорости электронов распределены по закону Максвелла, то эти электроны тормозятся постепенно по толщине анода, поэтому в рентгеновском спектре излучения присутствуют кванты со всевозможными энергиями. Полный переход кинематической энергии электронов  $E$  в максимальную энергию рентгеновского излучения происходит при минимальной длине волны  $E_{\max} = hc/\lambda_0$ , где  $h$  — постоянная Планка ( $h = 6,625 \cdot 10^{-34}$  Дж/с);  $c$  — скорость света;  $\lambda_0$  — минимальная длина волны. Приравнивая  $E$  и  $E_{\max}$ , получаем

$$\lambda_0 = hc/(eU) = 1,24 \cdot 10^{-6}/U.$$

Из последнего выражения следует, что с увеличением анодного напряжения  $U$  длина волны  $\lambda_0$  уменьшается, что приводит к излучению спектрального состава лучей рентгеновской трубки и повышению максимальной энергии непрерывного спектра.

При изменении анодного тока трубки спектральный состав непрерывного спектра не изменяется, однако интенсивность излучения уменьшается пропорционально уменьшению тока  $I_0$ . Экспозиционная доза  $X$  рентгеновского излучения пропорциональна анодному току трубки и времени просвечивания  $t$ :  $X = I_0 t$ .

Для рентгеновских трубок характерно, что их к. п. д. пропорционален анодному напряжению  $U$  и в зависимости от него составляет 1—2 % полной энергии всех электронов, тормозящихся на аноде. Остальная часть энергии превращается в теплоту и отводится с помощью охлаждаемой среды.

Регистрация рентгеновского излучения, прошедшего через сварное соединение, осуществляется эмульсией радиографической пленки. По способу применения пленки подразделяются на безэкранные и используемые с экраном. Эти экраны применяют для сокращения времени просвечивания и обеспечения лучшей выявляемости дефектов. Пленка, рассматриваемая в падающем свете, яркостью  $L_0$ , ослабляет этот свет, из-за чего яркость прошедшего света становится меньше  $L_{\Pi}$  и фотографическая плотность почернения определяется из уравнения  $D = L_0/L_{\Pi}$ , где  $L_0$  — яркость свечения экрана негатоскопа;  $L_{\Pi}$  — яркость свечения пленки.

Для радиографической пленки существует зависимость плотности почернения  $D$  пленки от логарифма относительной экспозиции  $\lg X$ , где на характеристической кривой (рис. 167) можно выделить область нормальной экспозиции, для которой справедливо уравнение

$$\Delta D = D - D_0 = \gamma (\lg X - \lg X_0),$$

где  $\gamma$  — средний градиент пленки;  $X$  и  $X_0$  — экспозиционные дозы, вызывающие почернение пленки с плотностью  $D$  и  $D_0$  соответственно.

В действительности любая радиографическая пленка подобного прямолинейного участка не имеет, поэтому градиент или контрастность характеристической кривой для каждой точки определяется соотношением

$$\gamma_D = dD/(d \lg D).$$

Следовательно, контрастность — это функция плотности почернения и экспозиции и для пленок различного типа эта зависимость не постоянна. Для безэкранных пленок контрастность пленки с ростом плотности почернения увеличивается, поэтому для них выгодна та плотность почернения, при которой возможен ее просмотр на существующем расшифровочном оборудовании. Максимальная контрастность пленок экранного типа получается при плотности почернения около двух.

Плотность почернения безэкранных пленок  $D_6$  пропорциональна числу проявленных зерен, а экспозиция  $X$  определяется

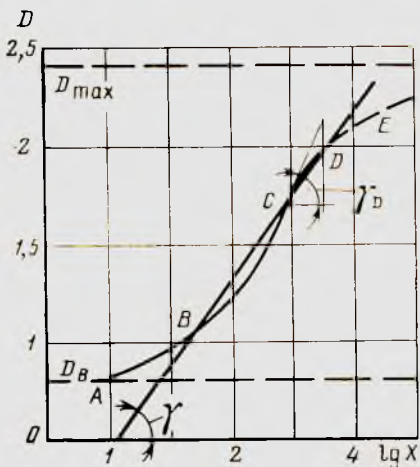


Рис. 167. ХАРАКТЕРИСТИЧЕСКАЯ КРИВАЯ РАДИОГРАФИЧЕСКОЙ ПЛЕНКИ:

AB — область недоэкспозиции; BC и CD — область нормальной экспозиции; DE — область переэкспозиции

числом квантов, приходящих на пленку, и уравнение можно записать

$$D_0 = D_{\max} [1 - \exp(-kX)],$$

где  $k$  — постоянная чувствительности пленки, зависящая от ее типа, энергии излучения и времени проявления;  $D_{\max}$  — максимальная плотность почернения. Для экранных пленок, применяемых с флуоресцентными усиливающими экранами, подобное уравнение имеет вид

$$D_0 = D_{\max} \left[ 1 - \frac{1}{(1 + kX^2)} \right].$$

Спектральная чувствительность пленки определяет способность ее получать различные плотности почернения после облучения ионизирующими излучениями различной энергии с одинаковой экспозиционной дозой. Спектральная чувствительность  $Q$  характеризуется величиной, обратной отношению дозы  $X$ , необходимой для получения одинаковой плотности почернения  $D$ .

Рентгеновская пленка имеет максимальную спектральную чувствительность в диапазоне энергий  $6,4 \cdot 10^{-15}$ — $8 \cdot 10^{-15}$  Дж, при энергиях выше  $40 \cdot 10^{-15}$ — $48 \cdot 10^{-15}$  Дж чувствительность почти постоянна. Для безэкранных пленок спектральная чувствительность определяется соотношением

$$Q = \frac{1}{X} = 0,434k \lg \left[ \frac{D_{\max}}{D_{\max} - D} \right].$$

Одной из важнейших характеристик радиографических пленок является разрешающая способность, которая характеризуется числом раздельно различимых штриховых линий одинаковой толщины на длине 1 мм. Высокую разрешающую способность имеют мелкозернистые пленки РТ-4М, РТ-5 в отличие от крупнозернистых пленок РТ-1 и РТ-2.

Усиливающее действие металлических и флуоресцентных экранов характеризуется коэффициентом усиления, определяемым отношением времени просвечивания без экрана к времени просвечивания с экраном. Усиливающее действие металлических экранов (свинца, вольфрама, олова и др.), применяемых при методе прямой экспозиции, определяется вторичными электронами, образующимися в экране при прохождении через него ионизирующего излучения. Материал экранов выбирают в зависимости от энергии источника излучения. Для рентгеновского излучения с напряжением до 100 кВ используют фольгу из свинца, олова, вольфрама; для рентгеновского излучения с напряжением более 100 кВ и гамма-излучения — вольфрам, свинец. Экраны выполняют в виде фольги толщиной 0,05—0,5 мм, которую наносят на гибкую пластмассовую подложку или ис-

Таблица 30

## ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ УСИЛИВАЮЩИХ ЭКРАНОВ

| Источники излучения                      |                                   | Толщина<br>стали, мм | Флуоресцентный экран |                          |                                 |              | Толщина свинцового экрана,<br>мм |          |
|------------------------------------------|-----------------------------------|----------------------|----------------------|--------------------------|---------------------------------|--------------|----------------------------------|----------|
| Рентгеновский<br>при напряже-<br>нии, кВ | Гамма-излу-<br>чение<br>(изотопы) |                      | Тип                  | Люминофор                | Количество люминофора,<br>мг/см |              | переднего                        | заднего  |
|                                          |                                   |                      |                      |                          | передний<br>экран               | задний экран |                                  |          |
| 10—60                                    | <sup>241</sup> Am                 | До 4                 | «Стандарт»           | CaWO <sub>4</sub>        | 60                              | 60           | —                                | —        |
| 60—120                                   | <sup>170</sup> Tm                 | 1—20                 | СБ                   | (Ba, Pb) SO <sub>4</sub> | 70                              | 70           | 0,02                             | 0,05     |
| 120—200                                  | <sup>75</sup> Se                  | 3—50                 | УС                   | ZnS (Ag)                 | 30                              | 110          | 0,05—0,08                        | 0,05—0,1 |
| 150—300                                  | <sup>192</sup> Ir                 | 5—80                 | УФДМ                 | CaWO <sub>4</sub>        | 40                              | 120          | 0,05—0,1                         | 0,1—0,2  |
| 200—400                                  | <sup>137</sup> Cs                 | 10—120               | ВП-1                 | CaWO <sub>4</sub>        | 80                              | 120          | 0,1—0,2                          | 0,2—0,3  |
| 300—1000                                 | <sup>60</sup> Co                  | 30—200               | ВП-2                 | CaWO <sub>4</sub>        | 120                             | 180          | 0,2—0,3                          | 0,3—0,5  |

Таблица 31

## ОСНОВНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПЕРЕНОСНЫХ РЕНТГЕНОВСКИХ АППАРАТОВ

| Тип        | Напряжение, кВ | Ток, мА | Излучение направленное (Н) или панорамное (П) | Частота импульсов, Гц | Фокусное пятно трубок, мм | Толщина разделя, мм | Мощность, кВт·А | Масса, кг |
|------------|----------------|---------|-----------------------------------------------|-----------------------|---------------------------|---------------------|-----------------|-----------|
| РУП-120-5  | 50—120         | 5       | Н                                             | —                     | 2×2                       | 25                  | 2               | 45        |
| РУП-160-6П | 50—160         | 6       | П                                             | —                     | 2×2                       | 40                  | 2,5             | 35        |
| РУП-200-5  | 70—200         | 5       | Н                                             | —                     | 2×2                       | 50                  | 3               | 82        |
| МИРА-1Д    | 90—110         | —       | П                                             | 15                    | d=2                       | 25                  | 0,3             | 12        |
| МИРА-2Д    | 140—170        | —       | П                                             | 15                    | d=3                       | 25                  | 0,4             | 15        |
| МИРА-3Д    | 220—250        | —       | П                                             | 15                    | d=3                       | 25                  | 0,4             | 20        |

пользуют отдельно. Усиливающее действие флуоресцентных экранов, применяемых при методе прямой экспозиции, определяется действием фотонов видимой, сине-фиолетовой, ультрафиолетовой и инфракрасной области спектра, высвечиваемых из люминофоров при прохождении через них ионизирующего излучения. Флуоресцентные экраны выполняют в виде пластмассовых или картонных подложек, на которые наносят слой люминофора. Используют экраны СБ на базе люминофора  $(\text{Ba}, \text{Pb})\text{SO}_4$ , УС на базе люминофора  $\text{ZnS}(\text{Ag})$ , УФДМ на базе люминофора  $\text{CaWO}_4$  и др. Наиболее рационально используют флуорометаллические усиливающие экраны, выполненные в виде свинцовой подложки с нанесенным на нее слоем люминофора. Эти экраны имеют больший коэффициент усиления, чем металлические, и обеспечивают лучшую чувствительность, чем флуоресцентные.

В радиографии стыков трубопроводов часто применяют двойную комбинацию из усиливающих экранов, между которыми устанавливают радиографическую пленку. Применение заднего металлического экрана позволяет увеличить коэффициент усиления и уменьшить влияние рассеянного излучения на пленку. Толщину металлических экранов, а также материал люминофора и его количество на поверхности флуоресцентного экрана выбирают в зависимости от энергии излучения (табл. 30).

Для радиографического контроля сварных соединений трубопроводов применяют рулонную рентгенографическую пленку РТ-СШ в светозащитной упаковке. Усиливающие экраны изготовляют из лавсана с покрытием солями тяжелых элементов, что обеспечивает экономию свинца. По чувствительности к дефектам и излучению рентгенографические снимки делят на четыре класса. К первому классу относятся особо мелкозернистые и высококонтрастные безэкранные пленки РТ-5, обеспечивающие наивысшую чувствительность к дефектам. Эти пленки применяют с металлическими усиливающими экранами или без них. Ко второму классу относятся мелкозернистые безэкранные пленки (тип РНТМ-1, РТ-СШ, РТ-4М), обладающие меньшей чувствительностью к дефектам (около 30 %), но большей чувствительностью к излучению. Их применение позволяет в несколько раз сократить время просвечивания по сравнению с пленками первого класса. К третьему классу относятся высокочувствительные к излучению безэкранные пленки РТ-1, РТ-2. Эти пленки обеспечивают наименьшее время просвечивания без люминесцентных экранов, и время для просвечивания используют в 5—10 раз меньше, чем при пленке первого класса. К четвертому классу относятся высокочувствительные к излучению экранные пленки (РТ-2 с экраном), обладающие высокой чувствительностью с люминесцентными экранами. Время сокращается в 10—100 раз в сравнении с пленками первого класса.



## Рентгеновские аппараты

В практике радиационной дефектоскопии применяют аппараты с постоянной нагрузкой и импульсные. Аппараты с постоянной нагрузкой выпускают двух типов:

аппараты — моноблоки, у которых рентгеновская трубка и трансформатор смонтированы в единые блок-трансформаторы, залитые маслом или заполненные газом; аппараты используют как для фронтального просвечивания направленным пучком излучения, так и для панорамного — кольцевым пучком излучения;

аппараты кабельного типа, состоящие из самостоятельного генераторного устройства, рентгеновской трубки и пульта уп-

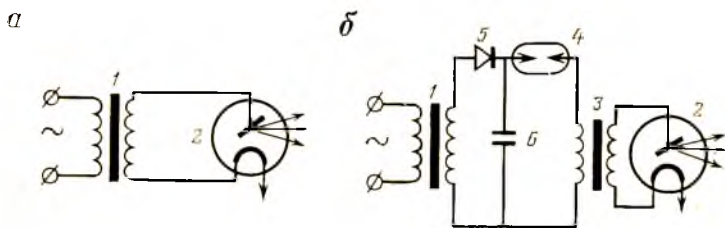


Рис. 168. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СХЕМЫ РЕНТГЕНОВСКИХ АППАРАТОВ:

а — моноблоков; б — импульсных; 1 — трансформатор; 2 — рентгеновская трубка; 3 — импульсный трансформатор; 4 — разрядник; 5 — электронный ключ; 6 — конденсатор

равления; их используют для фронтального и панорамного просвечивания (табл. 31).

Для работы в полевых и монтажных условиях используют портативные аппараты первого типа и импульсные аппараты с малой массой и размерами. Аппараты второго типа выпускают часто передвижными и используют для цеховых и лабораторных условий. В аппаратах-моноблоках используют рентгеновские трубки с неподвижным анодом и полуволновую электрическую схему без выпрямителя (рис. 168, а). В импульсных аппаратах применяют рентгеновские трубки, имеющие конусный анод и двухдисковый катод с отверстиями, concentрично расположенными относительно оси анода. Электрические схемы импульсных аппаратов имеют разрядник и пик-трансформатор (рис. 168, б). Вспышка рентгеновского излучения в импульсном аппарате возникает в рентгеновской трубке 2 под действием короткого импульса высокого напряжения, формируемого с помощью электронного ключа 5 и разрядника 4. Напряжение на трубку подается со вторичной обмотки импульсного пик-трансформатора 3 в момент разрядки конденсатора 6 через его первичную обмотку. Частота вспышек в импульсных рентгеновских аппаратах составляет 0,2—15 Гц, и импульс тока достигает 100—200 А.

## КОНТРОЛЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЕМ

Электромагнитное излучение, испускаемое при распаде ядер в искусственных и естественных радиоактивных веществах, называют гамма-излучением. Для контроля сварных соединений на трассе и строительных площадках в качестве источников гамма-излучения используют радиоактивные изотопы цезий 137 ( $^{137}\text{Cs}$ ), иридий 192 ( $^{192}\text{Ir}$ ) и тулий 170 ( $^{170}\text{Tm}$ ). Кроме указанных источников излучения в практике радиационной дефектоскопии применяют перспективные изотопы: стронций 90 ( $^{90}\text{Sr}$ ), селен 75 ( $^{75}\text{Se}$ ), европий 155 ( $^{155}\text{Eu}$ ), европий 152 ( $^{152}\text{Eu}$ ) и др.

Распад ядер радиоактивных изотопов имеет самопроизвольный статистический характер. В течение каждой секунды подвергается распаду определенная доля общего числа ядер и интенсивность гамма-излучения зависит от количества распадающегося радиоактивного вещества. Изменение активности радиоактивного вещества убывает по экспоненциальному закону

$$Q(t) = Q_0 e^{-0,693t/T},$$

где  $Q(t)$  — активность по прошествии времени  $t$ ;  $Q_0$  — активность в начальный период;  $T$  — период полураспада.

В этом случае основной характеристикой активности изотопа является период его полураспада — время, в течение которого в среднем распадается половина всех атомов данного вещества. Периоды полураспада для  $^{192}\text{Ir}$  — 74,02 дня,  $^{75}\text{Se}$  — 118,45 дня,  $^{170}\text{Tm}$  — 129 дней,  $^{137}\text{Cs}$  — 30,174 года. Активность источников гамма-излучения определяется числом атомов радиоактивного вещества, распадающихся в единицу времени ( $\text{с}^{-1}$ ), т. е. скоростью распада изотопа. Экспозиционная доза (Дж/кг) рентгеновского и гамма-излучения выражает энергию квантового излучения, преобразованную в кинетическую энергию заряженных частиц в единице массы атмосферного воздуха. Мощности экспозиционной (поглощенной) дозы (МЭД) рентгеновского излучения и гамма-излучения соответствует доза, поглощаемая в единицу времени. Мощность экспозиционной дозы измеряется в амперах на килограмм (А/кг). Кроме того, применяется внесистемная единица рентген в секунду (Р/с). Мощность экспозиционной дозы  $P$  излучения, прошедшего через поглотитель толщиной  $\delta$ , расположенный на расстоянии  $F$  от источника, выражается формулой

$$P = P_0 e^{-\mu\delta} B/F^2,$$

где  $P_0$  — мощность экспозиционной дозы гамма-излучения в отсутствии поглотителя, на расстоянии 1 м от источника;  $B$  — дозовый фактор накопления;  $\mu$  — коэффициент относительного уменьшения интенсивности излучения после прохождения поглотителя толщиной 1 см.

Гамма-эквивалент препарата является мерой сравнения изотопов по понизирующему действию их гамма-излучения. Для эталона принято гамма-излучение радия, при этом практически установлено, что 1 г радия при платиновом фильтре толщиной 0,5 мм создает на расстоянии 1 см экспозиционную дозу  $2,13 \cdot 10^{-3}$  Кл/кг. Радиационный выход изотопа, создающего такую же мощность экспозиционной дозы гамма-излучения, как 1 г радия, называется грамм-эквивалентом радия.

Интенсивность излучения есть отношение потока энергии частиц или квантов понизирующего излучения за некоторый промежуток времени к этому времени.

Для контроля качества сварных соединений в полевых и монтажных условиях применяют переносные и передвижные гамма-дефектоскопы, которые имеют защитные радиационные головки, обеспечивающие защиту оператора за счет снижения мощности дозы до допустимого уровня. При просвечивании сварных соединений в переносных гамма-дефектоскопах с помощью дистанционного управления открывают затвор радиационной головки и используют направленный пучок излучения. Их называют дефектоскопами шлангового типа.

Гаммарид-23 — переносной дефектоскоп — рассчитан на работу с несколькими источниками ( $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{192}\text{Ir}$ ). Просвечивание производится коническим пучком из защитного контейнера или панорамно при выдвижении источника по жесткому или гибкому ампулопроводу на расстояние до 12 м по горизонтали или до 6 м по вертикали. Подобное устройство имеют дефектоскопы Гаммарид-20, Гаммарид-21, Гаммарид-25, Гаммарид-20М, Гаммарид-25М, Гаммарид-192/40Т, Гаммарид-192/4, Гаммарид-192/120М. Передвижной гамма-дефектоскоп «Магистраль» («Трасса») применяют для контроля качества сварных соединений трубопроводов в процессе монтажа и эксплуатации. Просвечивание можно производить через одну или две стенки. В комплект передвижного аппарата входят радиационная головка, транспортный кожух радиационной головки, ручной пульт управления, электрический пульт управления, самоходная тележка, блок электропитания, транспортно-перезарядный контейнер, комплект приспособлений. Передвижной гамма-дефектоскоп «Магистраль-1» используют для контроля качества сварных стыков магистральных трубопроводов диаметром 1420 мм с толщиной стенки до 40 мм. Он комплектуется источником  $^{137}\text{Cs}$ . Электромеханический привод дефектоскопа обеспечивает перемещение радиационной головки внутри трубопровода на расстояние до 1,5 км. Дефектоскоп используют с автоматизированным комплексом АКП-141.

Для автоматизированных комплексов применяют самоходную установку «Парус-3М», которую доставляют к месту работы в закрытом автомобиле. Для просвечивания стыков трубопроводов установка «въезжает» в трубопровод, а после кон-

троля возвращается обратно. Установка «Парус-3М» в трубопроводе перемещается от электродвигателя со скоростью 15 м/мин. На установке может быть установлен любой рентгеновский аппарат или гамма-дефектоскоп. Гамма-дефектоскоп с точностью  $\pm 2$  мм устанавливается у стыка благодаря находящемуся снаружи трубы датчику управления и корректирующему устройству. Гамма-дефектоскоп при просвечивании совершает круговое движение для панорамного просвечивания стыка. Контроль 40—80 стыков в смену установка может осуществлять в непрерывном технологическом потоке, следуя непосредственно за центратором (ждущий режим), или непрерывно в сваренной нитке.

Для контроля качества сварных соединений трубопроводов применяют высокопроходимые передвижные лаборатории РМЛ-2В и ВЛК-2. Лабораторию РМЛ-2В устанавливают на шасси автомобиля ГАЗ-66, а ВЛК-2 — на тягач ГТ-Т.

Основным показателем качества выполнения снимка в радиографии является относительная чувствительность  $W_{\text{отн}}$ , определяемая по изображению на снимке деталей эталонов чувствительности. В трубопроводном строительстве используют канавочные эталоны чувствительности четырех типоразмеров. Каждый канавочный эталон имеет шесть канавок, глубина которых отличается в 1,39 раза одна от другой. Зависимость относительной чувствительности от основных параметров просвечивания с использованием канавочного эталона чувствительности (дефектометра) определяется уравнением

$$W_{\text{отн}} = \frac{2,3 \Delta D_{\min} B}{\gamma_D \mu \delta} \left( 1 + \frac{u}{\Delta b} \right) 100 \%,$$

Это уравнение учитывает влияние различных факторов: возможностей человеческого глаза ( $\Delta D_{\min}$  — минимальная разность плотностей почернения, различимая глазом (прибором); дозового накопления  $B$ ; контрастности пленки  $\gamma_D$ ; линейного коэффициента ослабления  $\mu$ ; толщины изделия  $\delta$ ; общей нерезкости изображения  $u$  и ширины канавки  $\Delta b$ . Величина  $\Delta D_{\min}$  минимальной выявляемой разности плотностей почернения между изображением дефекта и основным фоном снимка определяется рядом факторов, к которым относятся степень совершенства глаза оператора, яркость экрана расшифровочного оборудования и условия расшифровки, а также размеры и форма изображения дефекта. При яркости экрана расшифровочного оборудования 30 кд/м<sup>2</sup>  $\Delta D_{\min} = 0,006 \div 0,02$ .

Общую нерезкость изображения определяют наличием нескольких видов нерезкостей. Геометрическая нерезкость  $u_f = d\delta / (F - \delta)$ , где  $d$  — диаметр фокусного пятна источника излучения;  $F$  — расстояние от источника излучения до эмульсии пленки (фокусное расстояние);  $\delta$  — толщина контролируемого изделия.

Внутренняя нерезкость  $u_v$  зависит от энергии излучения, и для рентгеновского излучения с использованием усиливающих экранов из Pb  $u_v = 0,025 \div 0,1$  мм, для гамма-излучения и экранов из Pb  $u_v = 0,17 \div 0,5$  мм. Нерезкость рассеяния  $u_p = u_R g^{\delta}$ , где  $g$  — коэффициент пропорциональности;  $\delta$  — толщина просвечиваемого изделия. Для рентгеновского излучения коэффициент  $g = 1,25$ ; для изотопа  $^{192}\text{Ir}$   $g = 1,15$ ; для  $^{137}\text{Cs}$   $g = 1,09$  и для изотопа  $^{60}\text{Co}$   $g = 1,04$ . Общая нерезкость изображения, кроме перечисленных дефектов, зависит также от формы дефекта или эталона чувствительности. Для канавочных эталонов чувствительности и дефектов ступенчатого типа (непровары, трещины и т. п.) общую нерезкость определяют из выражения

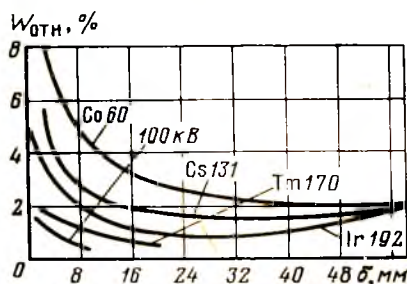


Рис. 169. ЗАВИСИМОСТЬ ОТНОСИТЕЛЬНОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ  $W_{отн}$  ОТ ТОЛЩИНЫ СТАЛИ  $\delta$  ПРИ КОНТРОЛЕ РЕНТГЕНОВСКИМИ И ГАММА-ЛУЧАМИ

$u = \sqrt[3]{u_R^3 + u_v^3}$ ; для дефектов овального типа (пор, шлаковых включений, раковин и т. п.).

$$u = u_R + \frac{u_v}{2u_R} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{2u_R}{u_v}\right) \right].$$

При просвечивании толстостенных изделий в двух последних уравнениях  $u_v$  заменяют на  $u_p$ .

Контраст изображения  $C_n$  определяет выявляемость дефектов

$$C_n = \frac{L_d - L_0}{L_0} \left( 1 + \frac{u}{\Delta b} \right) 100 \%,$$

где  $L_d$  — яркость дефектного участка изображения;  $L_0$  — яркость бездефектного участка изображения;  $\Delta b$  — ширина дефекта. Минимальное значение контраста изображения не превышает 1,4—2 %.

На практике для просвечивания трубных и резервуарных изделий относительную чувствительность вычисляют по формуле

$$W_{отн} = \frac{h}{\delta_1 + \delta_2} 100 \%,$$

где  $h$  — наименьшая глубина канавки дефектометра, выявленная на снимке;  $\delta_1$  — толщина основного металла;  $\delta_2$  — толщина эталона (рис. 169).



При просвечивании кольцевых стыков трубопроводов источник излучения (рентгеновский аппарат или гамма-дефектоскоп) помещают снаружи или внутри трубы. В первом случае (рис. 170, а) просвечивание проводят через одну стенку, во вто-

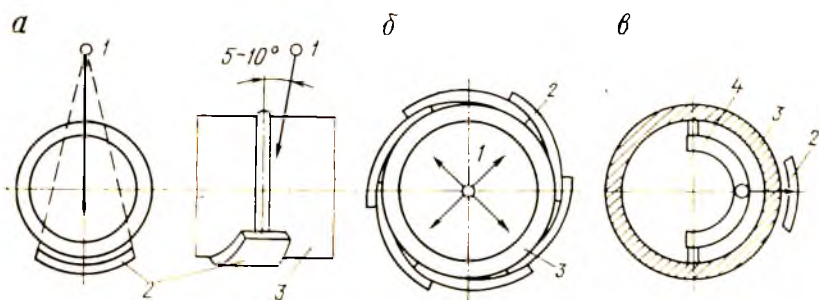


Рис. 170. СХЕМА УСТАНОВКИ ИСТОЧНИКА ИЗЛУЧЕНИЯ ПРИ КОНТРОЛЕ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТРУБОПРОВОДОВ И СФЕРИЧЕСКИХ РЕЗЕРВУАРОВ:

а — внутри трубы; б — снаружи трубы; в — на поворотной лестнице; 1 — источник излучения; 2 — кассета; 3 — труба, сферический резервуар; 4 — поворотная лестница

ром — через две (рис. 170, б). Просвечивание через две стенки выполняется за несколько установок путем крепления источника излучения снаружи трубы. В этом случае кассету с пленкой располагают снаружи трубы со стороны, противоположной источнику излучения. По этой

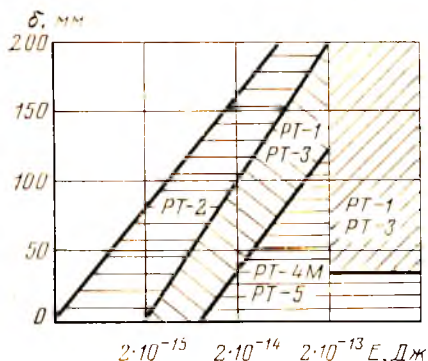


Рис. 171. ОБЛАСТИ ПРИМЕНЕНИЯ РАДИОГРАФИЧЕСКИХ ПЛЕНОК ПРИ ПРОСВЕЧИВАНИИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

схеме можно просвечивать трубопроводы различных диаметров. Однако при просвечивании трубопроводов диаметром менее 400 мм необходимо источник излучения смещать от шва на 10—20 мм. При просвечивании шаровых резервуаров применяют два метода: направленным лучом и панорамное. Просвечивание направленным лучом используют для контроля швов укрупнительной сборки лестников в блоки и контроля швов готового резервуара (рис. 170, в). Дефектоскопы (рентгенов-

ские аппараты и гамма-дефектоскопы) располагают снаружи или внутри резервуара, используя поворотную лестницу.

Панорамное просвечивание осуществляют с помощью радиоактивных источников излучения, обеспечивая одновременный контроль всех швов за одну экспозицию. В этом случае источ-



ник излучения устанавливают в центре шара и применяют штанговые гамма-дефектоскопы с дистанционным управлением. Гамма-дефектоскоп устанавливают в низу резервуара, а конец гибкого ампулопровода с помощью стойки или троса закрепляют в центре шара. Далее с помощью дистанционного пульта управления, расположенного за пределами резервуара, по ампулопроводу перемещают источник гамма-излучения в центр шара. На поверхности резервуара кассеты крепят с помощью резиновых жгутов, малогабаритных магнитов или специальных поясов с карманами для кассет. Время экспозиции в этом случае может быть 11 ч (источник  $^{137}\text{Cs}$ ).

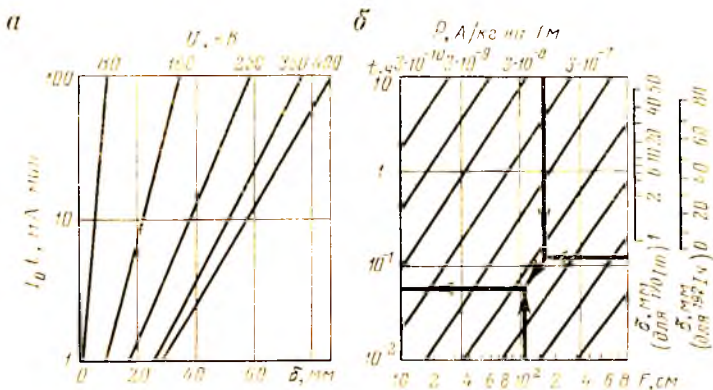


Рис. 17.2. НОМОГРАММЫ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ВРЕМЕНИ ПРОСВЕЧИВАНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ:

а — просвечивание рентгеновскими лучами (пленка РТ-1,  $D=1.5$ , экран из Рб,  $\delta=0.05$  мм,  $F=75$  см); б — просвечивание гамма-лучами (пленка РТ-1,  $D=1.5$  для  $^{170}\text{Tm}$ , экран из Рб,  $\delta=0.05/0.05$  мм, для  $^{192}\text{Ir}$  экран из Рб,  $\delta=0.1/0.2$  мм)

Для получения высокой чувствительности просвечивания используют низкоэнергетические источники излучения и высококонтрастные мелкозернистые безэкранные пленки с металлическими усиливающими экранами. Для обеспечения высокой производительности применяют источники высокой энергии, высокочувствительные безэкранные пленки с усиливающими экранами и экранные пленки с флуоресцентными усиливающими экранами.

**Пример.** Выбрать источник излучения, радиографическую пленку и усиливающие экраны для просвечивания сварных соединений трубопровода с толщиной стенки  $\delta=10$  мм для получения максимальной производительности и наилучшей чувствительности контроля. Высокую чувствительность получают при использовании рентгеновских аппаратов. По табл. 30 выбираем необходимое напряжение на трубке в диапазоне 60—120 кВ. По табл. 31 находим аппарат РУП-120-5, из рис. 171 определяем марку пленки РТ-2. Для получения максимальной производительности просвечивания выбираем флуоресцентный экран типа УС.

В зависимости от схемы просвечивания сварного соединения и применения радиографических материалов определяют параметры просвечивания, основным из которых является фокусное расстояние:

$$F = \delta (d/u_r + 1).$$

Геометрическую нерезкость устанавливают из условия  $u_r \leq u_b$  при просвечивании тонкостенных изделий;  $u_r \leq u_p$  при просвечивании изделий большой толщины, когда рассеянное излучение оказывает значительное влияние на выявляемость дефектов. В этом случае общая нерезкость изображения  $u$  при  $u_r = u_p$  определяется:

для ступенчатых дефектов

$$u = 1,25 \sqrt{u_p^3 + u_r^3} = 1,25 u_p;$$

для овальных дефектов

$$u = u_r + \frac{u_p}{2u_r} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{2u_r}{u_p}\right) \right] = 1,43 u_p.$$

При  $u_r = u_b$  общая нерезкость равна  $u = 1,25 u_b$  и  $u = 1,43 u_b$ .

*Пример.* Определить фокусное расстояние при просвечивании сварного соединения резервуара с толщиной стенки  $\delta = 26$  мм источником излучения  $^{137}\text{Cs}$  с размером активной части  $d = 5$  мм.

Принимая  $u_r = u_b = 0,3$  мм, получаем  $F = 26 (5/0,3 + 1) \approx 460$  мм.

Время просвечивания при радиографии устанавливают по номограммам экспозиций (рис. 172) или с помощью автоматического экспонометра ГЭУ-1, измеряющего и задающего требуемую дозу облучения для пленки.

## УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Ультразвуковую дефектоскопию применяют в строительстве при определении качества сварных соединений с толщиной стенки 20 мм и более. Контроль ультразвуком обладает значительными преимуществами перед рентгено- и гаммаграфированием по своей простоте и дешевизне. Для контроля используют ультразвуковые волны, которые представляют собой механические колебания упругой среды обычно с частотой 0,8; 1,8; 2,5; 3,5 МГц. При этом используется способность ультразвуковых волн проникать в металл на значительную глубину и отражаться от неметаллических включений или пустот, находящихся в металле. Для получения ультразвуковых колебаний используют свойство кристаллов кварца, титаната бария, сегнетовой соли мгновенно преобразовывать электрические колебания в механические и наоборот. Под действием импульсов тока, которые подводятся от генератора, в пластинках титаната бария возникают собственные упругие колебания. Мощность, передаваемая пластинкой в окружающую среду, пропорциональна площади кристалла и квадрату амплитуды подводимого напряжения. Введенные в упругую среду импульсы вызывают волны; параллельные направлению — продольные и перпендикулярные к направлению — поперечные. Для дефектоскопии сварных швов используют поперечные волны, которые создаются искателем, имеющим пластинку титаната бария и обеспечивающим ввод в сварной шов ультразвуковых волн под углом 29—70°. Это по-

звонит вести контроль сварных соединений без снятия усиления. Волны свободно проходят через металл шва и отражаются от среды, имеющей другое акустическое сопротивление. Акустическое сопротивление выражается произведением плотности среды  $\rho$  на скорость звука  $c$  в этой среде. Коэффициент отражения  $R$  выражается зависимостью

$$R = \left( \frac{\rho_1 c_1 - \rho_2 c_2}{\rho_1 c_1 + \rho_2 c_2} \right)^2,$$

где  $\rho_1 c_1$  и  $\rho_2 c_2$  — акустические сопротивления первой и второй сред.

От прослойки воздуха в стали, что соответствует трещине, отражается до 90 % энергии ультразвуковых колебаний.

Для обеспечения необходимого акустического контакта искателя с изделием зону установки искателя тщательно зачищают и смазывают различными жидкими смазками, устраняющими прослойку воздуха. В качестве смазок используются масла (автол-6 и автол-10), глицерин, а также вода или мыльный раствор.

На рис. 173 изображена схема ультразвукового контроля эхо-импульсным методом с совмещенной схемой включения. Для обнаружения дефекта ультразвуковые колебания создаются искателем 4, который воспринимает импульсы тока от генератора 1. При встрече с дефектом 5 волны отражаются от него и снова попадают на пластинку искателя в момент перерыва между очередными импульсами, преобразуясь в электрические колебания, поступающие на усилитель 2. Последние после усиления подаются на электронно-лучевую трубку 3, которая служит индикатором полученных сигналов. По виду отклонения луча на экране электронной трубки судят о характере дефектов. Ультразвуковые дефектоскопы имеют электронный глубиномер, который показывает глубину залегания дефекта. Действие глубиномера основано на измерении времени прохождения звуковой волны от искателя до дефекта и обратно с учетом установленного угла наклона.

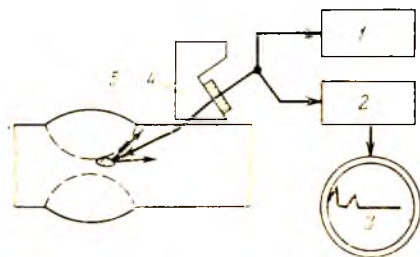


Рис. 173. СХЕМА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ

В процессе контроля сварного соединения искатель перемещается по основному металлу вдоль шва зигзагообразно (рис. 174, а). Швы толщиной более 200 мм контролируют прямым лучом с установкой искателей с двух сторон шва (рис. 174, б). Сварные соединения в конструкциях с толщиной стенки 20—200 мм контролируют с одной стороны прямым лучом и одним

раз отраженным (рис. 174, в). Угол ввода луча выбирают таким, чтобы его ось пересекла ось симметрии шва на глубине, равной половине толщины металла. При толщине основного металла 8—20 мм сварные соединения контролируют искателем с углом ввода луча  $65^{\circ}$ — $70^{\circ}$ . В этом случае нижнюю часть шва (рис. 174, г) прозвучивают дважды отраженным лучом,

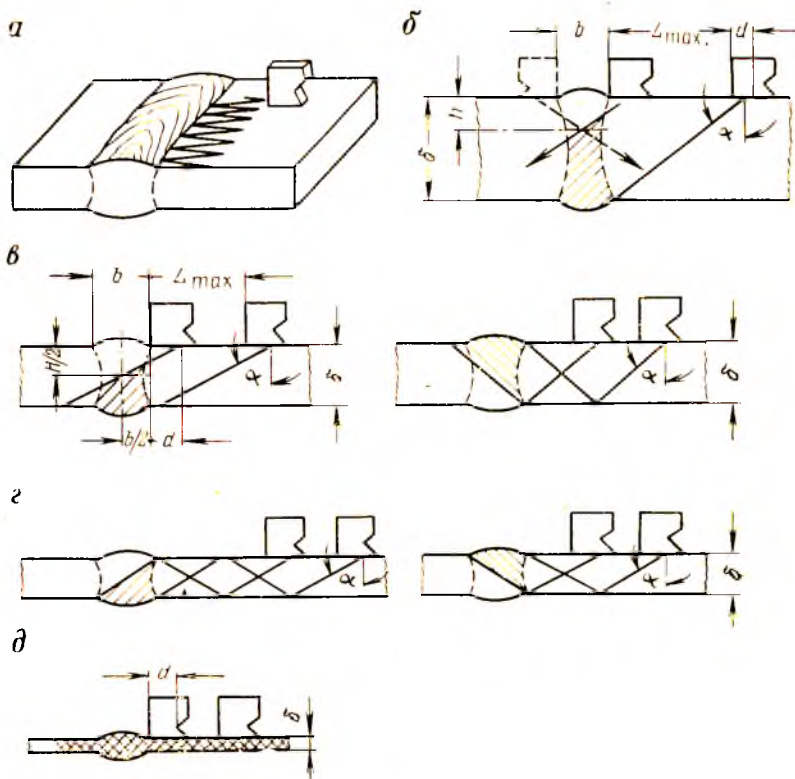


Рис. 174. СХЕМА УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ДЕФЕКТОСКОПИИ СВАРНЫХ ШВОВ

а верхнюю — один раз отраженным лучом. Сварные соединения толщиной менее 8 мм контролируют многократно отраженным лучом. При работе искателем с прямым лучом зона контролируемого сечения стыкового шва ограничена. Во время смещения точки ввода луча от оси шва (рис. 174, д) луч уходит от корня шва на обратную плоскость основного металла. В этом случае для проверки всего сечения шва от корня до усиления целесообразно пользоваться однократно и многократно отраженным лучом. Длины перемещения искателя  $L_{\min}$  и  $L_{\max}$  (см. рис. 174, б и в) можно определить из формул:

$$L_{\min} = n\delta \operatorname{tg} \alpha - d; \quad L_{\max} = (n+1)\delta \operatorname{tg} \alpha - d,$$

где  $n$  — число отражений луча;  $\delta$  — толщина свариваемого металла;  $\alpha$  — угол ввода луча;  $d$  — расстояние центра излучения от передней грани шупа.

Для приведенных схем прозвучивания сварных соединений можно установить истинную глубину залегания дефекта, используя расстояние  $l$  от пьезоэлемента искателя до дефекта, определяемого по ходу луча, и установить место расположения дефекта из уравнений:

для прозвучивания прямым лучом

$$h = (l - d) l_0 \sin \gamma;$$

для прозвучивания отраженным лучом

$$h = 2\delta + (d - l) \cos \gamma,$$

где  $h$  — глубина залегания дефекта от поверхности установки искателя;  $l$  — расстояние от передней грани искателя до дефекта;  $d$  — длина хода луча в призме шупа;  $l_0$  — расстояние от пьезоэлемента искателя до дефекта;  $\gamma$  — угол преломления луча, зависящий от  $\alpha$ , материала изделия и призмы шупа;  $\delta$  — толщина свариваемого металла.

Для контроля качества сварных соединений трубопроводов и резервуаров применяют ультразвуковые дефектоскопы УДМ-3, ДУК-66, ДУК-66П, а также лабораторию автоматизированного контроля УД-22ЭК.

## КОНТРОЛЬ НЕПРОНИЦАЕМОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Контроль сварных соединений на непроницаемость (плотность) применяют в тех случаях, когда конструкции предназначены для работы с жидкостями или газами. Сварные конструкции на непроницаемость испытывают после сварных соединений по внешнему осмотру. Нарушение непроницаемости швов возможно при наличии в них трещин, газовых пор и непроваров. Пробная жидкость проникает через эти неплотности за счет ее высокого капиллярного давления. Для испытания сварных соединений на плотность наиболее часто применяют керосин, люминесцентные жидкости («Шубекол», ЛЖ1-4 и др.), цветные жидкости (смесь бензола и скипидара с краской типа «Судан»). Процесс проникновения жидкостей в дефекты сварных соединений можно в общем виде представить формулой

$$l = \sqrt{t \cos \theta} \sqrt{\gamma/(2\mu)},$$

где  $l$  — расстояние, проходимое жидкостью по дефекту;  $t$  — время проникновения жидкости;  $\theta$  — угол смачивания;  $\gamma$  — поверхностное натяжение;  $\mu$  — вязкость жидкости;  $\sqrt{\gamma/(2\mu)}$  — коэффициент проникновения жидкости.



По этой формуле можно определить не только расстояние, проходимое жидкостью в глубь дефекта, но и время проникновения жидкости. В формуле не указана температура жидкости, хотя она оказывает влияние на процесс контроля. С понижением температуры увеличивается вязкость жидкости и уменьшается скорость ее движения. Поэтому для сокращения времени

контроля разрешается смазывать швы, предварительно нагретые до температуры 60—70 °С.

При испытании сварных соединений керосином для лучшего обнаружения дефектов швы предварительно очищают от грязи и ржавчины и покрывают водным раствором мела ту контролируемую поверхность, которая более доступна для обнаружения дефектов. После того как меловой раствор высохнет, обратную сторону шва обильно смазывают керосином, который наносят на поверхность из краскопульта или кисточкой.

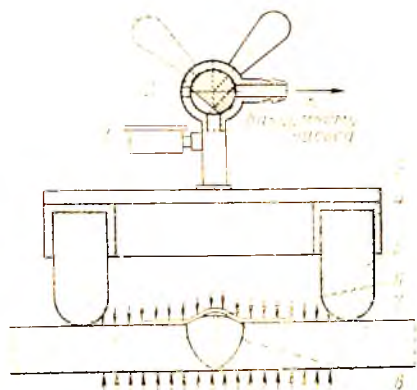


Рис. 175. СХЕМА ОПРЕДЕЛЕНИЯ НЕПРОНИЦАЕМОСТИ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ВАКУУМНЫМ МЕТОДОМ

Время испытания  $t$  зависит от толщины сваренного металла  $\delta$  и положения шва в пространстве. Для стыковых и односторонних тавровых соединений в нижнем положении оно составляет:

| $\delta$ , мм        | $t$ , мин |
|----------------------|-----------|
| До 6 . . . . .       | 40        |
| От 6 до 25 . . . . . | 60        |
| Свыше 25 . . . . .   | 90        |

Для швов, расположенных в вертикальном положении, это время увеличивается в полтора раза, а для двусторонних швов — в два раза. Неплотности швов выявляют по появлению жирных точек или полос на меловой поверхности, которые со временем расплываются в пятна. Появление отдельных точек указывает на наличие пор и свищей, а наличие полосок говорит о имеющихся сквозных трещинах. Керосиновая проба эффективна при температуре окружающей среды до —25 °С, что связано с изменением вязкости жидкости.

Испытание сварных соединений на непроницаемость люминесцентными жидкостями подобно контролю керосиновой пробой, но здесь не применяют меловую краску, так как место выхода жидкости освещается ультрафиолетовыми лучами. Жидкость под действием лучей светится, что показывает на наличие дефектов. Для цветных жидкостей не требуется каких-либо ин-



дикаторов, так как они отчетливо отмечают места дефектов благодаря своему цвету. Хорошо выявляются дефекты даже при незначительном количестве проникшей краски. Внутренние дефекты, не имеющие сквозного выхода, не обнаруживаются при испытаниях непроницаемости.

Вакуумный метод контроля плотности сварных соединений основан на создании в специальной камере вакуума с одной стороны поверхности шва и обнаружении проникающего воздуха через неплотности в шве. Подобный контроль применяют для испытания днищ, кольцевых и продольных стыков стенок резервуаров и других листовых конструкций.

Контроль осуществляют вакуум-камерой, которую устанавливают на проверяемый участок.

Вакуум-камера (рис. 175) состоит из следующих основных частей: стальной рамки 4, губчатой прокладки 5, прозрачного листа из пластмассы 3, манометра 1 и трехходового крана 2, который соединен с вакуум-насосом РВН-20. Перед установкой вакуум-камеры на испытуемый участок шва 8 место испытания очищают от шлака, загрязнений и смачивают индикаторным раствором 6, который создает пену при попадании воздуха. Вакуумный насос, соединенный с камерой, создает в ней разрежение, которое контролируют вакуумметром. Одновременно с этим через стекло вакуум-камеры осматривают сварной шов. При наличии сквозных дефектов в шве или прилегающем к нему металле 7 на поверхности образуются пузыри. Дефектные места отмечают мелом или цветным карандашом рядом с камерой, а после ее снятия переносят их на сварной шов. В качестве пенного индикатора обычно используют мыльный раствор, который в зимнее время готовят с добавлением хлористых солей ( $\text{NaCl}$ ,  $\text{CaCl}_2$ ). Производительность вакуумного метода составляет 40—60 м/ч.

---

## Глава 17

### ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ СВАРОЧНЫХ РАБОТ В МОНТАЖНЫХ УСЛОВИЯХ

В нашей стране вопросам техники безопасности и охраны труда уделяется огромное внимание, что регламентируется многими стандартами и обязательными постановлениями, которые согласуются с органами ВЦСПС как по отраслям, так и в целом по стране. Сварка требует соблюдения определенного комплекса правил техники безопасности и охраны труда, которые необходимо строго соблюдать при выполнении работ. Для всех методов сварки в той или иной степени

существует возможность опасных воздействий на сварщика следующих факторов: поражение электрическим током при прикосновении человека к токоведущим частям электрической цепи; поражение лучами электрической дуги глаз и открытой поверхности кожи; ожоги от капель, брызг металла и шлака при сварке; отравление вредными газами, выделяющимися при сварке; взрывы от неправильного обращения с баллонами сжиженного газа или в результате проведения сварки вблизи легковоспламеняющихся и взрывоопасных веществ; пожары от расплавленного металла и шлака в процессе сварки; травмы различного рода механического характера при подготовке изделий к сварке и в процессе сварки. Как показывают статистические данные, 80 % травм сварщиков связано с транспортными операциями металлических изделий.

### **ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ СВАРКЕ**

При сварке, а также при газопламенной обработке имеющиеся профессиональные опасности и вредности, а также источники возможного травматизма учитывают при организации работ. Все рабочие должны быть тщательно проинструктированы безопасным методам выполнения работ.

#### **Источники электрического тока**

Кожный покров человека в сухом состоянии оказывает значительное сопротивление прохождению тока. Расчетное сопротивление человека составляет 1000 Ом. Безопасным для жизни, но вызывающим болезненное ощущение, считается ток 0,03—0,05 А. Предельным безопасным напряжением для человека можно считать:  $U_{\text{пред}} = IR = 0,05 \cdot 1000 = 50$  В. Однако при влажной коже или ее повреждениях сопротивление снижается до 400 Ом, и безопасным считается напряжение не выше 12 В (переносное освещение). Если сварщик может иметь большую площадь контакта с металлической поверхностью, с целью устранения опасности поражения электрическим током необходимо соблюдать ряд мероприятий. Изоляция всех проводов, связанных с питанием источника тока и сварочной дуги, устройство закрытых включающих устройств, заземление корпусов сварочных аппаратов должны быть надежны. Необходимо заземлять корпуса источников питания, аппаратные ящики, вспомогательное электрическое оборудование. Сечение заземляющихся проводов должно быть не менее 25 мм<sup>2</sup>. Подключением и ремонтом сварочного оборудования занимается только дежурный электрик, а сварщику запрещается проводить эти работы. В источниках питания необходимо применять автоматические выключатели высокого напряжения, которые в мо-

мент холостого хода разрывают сварочную цепь и обеспечивают на держателе напряжение 12 В. Электродержатель должен иметь гарантируемую изоляцию, исключающую случайный контакт токоведущих частей со свариваемым изделием или руками сварщика, а также высокую механическую прочность и выдерживать не менее 8000 зажимов электродов. Сварщики обязаны работать в исправной сухой спецодежде и рукавицах. При тесных работах в трубопроводах и замкнутых пространствах резервуаров необходимо использовать резиновые галоши и коврики, источники освещения с напряжениями не выше 6—12 В. Для предотвращения поражения электрическим током запрещается притрагиваться к клеммам и зажимным болтам цепи высокого напряжения, снимать крышки клеммников электродвигателей подающего и ходового механизмов автоматов и полуавтоматов; открывать дверцы аппаратного ящика и трансформаторов и регулировать их и т. п.

### Лучистая энергия, выделяемая дугой

Спектр электрической дуги содержит инфракрасные видимые и ультрафиолетовые лучи. Свет сварочной дуги превышает в 16 000 раз максимальную яркость, допустимую для незащищенного глаза, и при облучении в течение 10—15 с лучи могут вызвать ожог. Более длительное воздействие дуги может привести к повреждению хрусталика глаза и потере зрения. Ультрафиолетовое излучение вызывает ожоги глаз и кожи, а инфракрасное может вызвать помутнение хрусталика глаза. Воздействие излучения дуги вредно не только для сварщиков, но и для подручных рабочих.

Таблица 32

ОБЩИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗАЩИТНЫХ СТЕКОЛ

| Обозначение светофильтра | Номер | Проницаемость лучей*, % |              | Назначение                                                                      |
|--------------------------|-------|-------------------------|--------------|---------------------------------------------------------------------------------|
|                          |       | видимых                 | инфракрасных |                                                                                 |
| Э-1                      | 9     | 0,03—0,08               | 1            | Для сварки при токе 30—75 А                                                     |
| Э-2                      | 10    | 0,0035—0,015            | 0,3          | Для сварки при токе 75—200 А                                                    |
| Э-3                      | 11    | 0,0005—0,002            | 0,1          | Для сварки при токе 200—400 А                                                   |
| Э-4                      | 12    | 0,0005—0,002            | 0,1          | Для сварки при токе более 400 А                                                 |
| В-1                      | 2—4   | 0,2—0,6                 | 3—4          | При работе на открытых площадках с ярким освещением, на вспомогательных работах |
| В-2                      | 3     | 0,2—0,6                 | 3—4          | Для вспомогательных рабочих при сварке в цехах                                  |

\* Для ультрафиолетовых лучей 0%.

Для предотвращения поражения глаз необходимо применять защитные стекла — наиболее темные сварщикам и более светлые — вспомогательным рабочим (табл. 32). Защитные стекла вставляются в щитки и маски, снаружи закрывают простым стеклом для предохранения их от брызг расплавленного металла. Щитки изготовляют из изоляционного материала — фибры, фанеры, и по форме и размерам они должны защищать лицо и голову сварщика.

### **Нагретый металл, капли и брызги металла**

Нагрев особенно опасен, если сварку ведут внутри трубопровода, резервуара или в сосуде, содержащем остатки горючих газов или воспламеняющихся жидкостей. Перед сваркой такие закрытые полости необходимо тщательно промыть, пропарить с определением отсутствия взрывоопасной смеси. Образующиеся при сварке брызги расплавленного металла имеют температуру до 1800 °С, при которой одежда разрушается. Для защиты от брызг обычно используют спецодежду (брюки, куртку и рукавицы) из брезентовой или специальной ткани. Одежда сварщика не должна иметь складок, открытых карманов или разрезов, куда могли бы попасть брызги и расплавленные капли; при сварке обязательно ношение головного убора и плотных брезентовых рукавиц. Вблизи места сварки не должно быть горючих материалов, приготовленных к нанесению битумных мастик, стружки, тканей и др. Особенно опасны ацетиленовые генераторы или баллоны со сжатыми газами, которые могут при нагреве или неосторожном обращении взорваться. Для защиты от соприкосновения с влажной, холодной землей и снегом, а также с холодным металлом в монтажных условиях сварщики должны обеспечиваться теплыми подстилками, матами, подколениками и подлокотниками из огнестойких материалов с эластичной прослойкой.

### **Вредные газы и аэрозоли**

Высокая температура дуги (6000—8000 °С) неизбежно приводит к тому, что часть сварочной проволоки, покрытий, флюсов переходит в парообразное состояние. Эти пары, попадая в атмосферу замкнутого объема, конденсируются и превращаются в аэрозоль конденсации, частицы которой по дисперсионности приближаются к дымам и легко попадают в дыхательные пути сварщиков, усваиваясь тканями легких и желудка. Особенно опасны соединения марганца, вызывающие при длительном вдыхании заболевание легких (пневмокониоз). Электро-сварочная пыль содержит около 92 % окислов железа, 2 % соединений марганца, 2 % соединений кремния. Во время сварки корня шва внутри трубы рабочий должен пользоваться

специальным защитным шлемом с подачей свежего воздуха под него. Если рабочий работает без специального шлема, то должна применяться принудительная вентиляция, не допускающая загрязненность воздуха выше предельной допустимой концентрации, мг/м<sup>3</sup>:

|                                       |     |
|---------------------------------------|-----|
| Окись углерода . . . . .              | 30  |
| Фтористые соединения . . . . .        | 0,5 |
| Окись марганца . . . . .              | 0,3 |
| Аэрозоли общей концентрации . . . . . | 4   |

Скорость движения воздуха внутри трубопровода должна быть не менее 0,25 и не более 1,5 м/с. При сварке в тесных замкнутых объемах предусматривается необходимая норма обмена воздуха (в м<sup>3</sup> на 1 кг расхода сварочных материалов при вентиляции):

### Ручная дуговая сварка

Углеродистых и низколегированных сталей электродами с покрытием

рутилового и рутилкарбонатного типов:

АНО-3, МР-3, ОЗС-4 . . . . . 2000—6200

фтористокальциевого типов:

УОНИ 13/45 . . . . . 2800—3400

УОНИ 13/55 . . . . . 4300—5400

руднокислого и ильменитового типов:

ЦМ-7, СМ-5 . . . . . 5700—8000\*

### Полуавтоматическая сварка углеродистой стали

В среде углекислого газа:

электродной проволокой Св-08Г2С . . . . . 2000

порошковой проволокой марок:

ПП-ДСК-1, ЭПС-15/2 . . . . . 1900—2900\*

ПП-АНЗ . . . . . 5400\*

### Автоматическая и полуавтоматическая сварка стали

Под плавным флюсом АН-348А, АН-26 . . . . . 40—400

Газовая сварка стали:

ацетилено-кислородным пламенем (на 1 кг ацетилена) . . . . . 4400

с использованием пропан-бутановых смесей (на 1 кг газовой смеси) . . . . . 3000

Газовая резка сталей (на 1 м длины реза металла толщиной 1 мм):

углеродистых и низколегированных . . . . . 75

высокомарганцовистых . . . . . 400

\* Необходимо применять респиратор или подавать воздух под маску. Приведем количество воздуха (в м<sup>3</sup>), необходимое для уменьшения концентрации вредных веществ при контактной и газовой сварке и термической резке:

Контактная сварка стали:

стыковая (на 75 кВ·А номинальной мощности машины) . . . . . 4000

точечная (на 50 кВ·А номинальной мощности машины) . . . . . 400

## Источники взрывов

Опасность взрывов возникает при неправильной транспортировке, хранении и использовании баллонов со сжатыми газами, необходимо соблюдать требуемые меры безопасности: не бросать баллоны, не устанавливать их вблизи нагревательных приборов, не хранить вместе баллоны с кислородом и горючими газами, баллоны хранить в вертикальном положении. При замерзании влаги в редукторе баллона с  $\text{CO}_2$  отогревать его только через специальный электроподогреватель или обкладывая тряпками, намоченными в горячей воде. Применение открытого пламени для отогрева любых баллонов со сжатыми газами категорически запрещено, так как это почти неизбежно приводит к взрыву баллона. При проведении сварочных работ в емкостях, ранее использованных для хранения продукта, требуется выяснить вид продукта и наличие его остатков. Для сварочных работ обязательна тщательная очистка сосуда от остатков и двух-, трехкратная промывка 10 %-ным раствором щелочей с последующей продувкой сжатым воздухом или паром для удаления запаха, который может вредно действовать на сварщика. Категорически запрещается продувка емкости кислородом, так как в случае попадания кислорода на одежду и кожу сварщика при любом открытом источнике огня он вызывает интенсивное возгорание одежды и приводит к ожогам со смертельным исходом. Взрывоопасность возникает и при проведении работ в помещениях, имеющих большое количество пылевидных органических веществ (торфа, каменного угля). Эта пыль при определенной концентрации может создать взрыв большой силы. Для проведения сварочных работ требуется тщательная вентиляция помещения и специальное разрешение пожарной охраны.

## Источники пожаров

Опасность возникновения пожаров существует в тех случаях, когда сварку выполняют по металлу, закрывающему дерево или горючие изоляционные материалы, на деревянных лесах, вблизи легковоспламеняющихся материалов и т. п. Необходимо соблюдать осторожность при перемещении сварочных проводов. Особую опасность представляет искрение проводов при нарушении изоляции в местах, удаленных от сварщика и недоступных его наблюдению. Категорически запрещается перемещение сварщика с зажженной горелкой или резаком за пределы его рабочего места, а также подъем его по лестницам, лесам и т. п. При тушении керосина, бензина и нефти, загоревшихся электрических проводов, а также помещений, где находится карбид кальция, запрещается применять воду и пенные огнетушители. В этих случаях необходимо пользоваться песком и углекислотными или сухими огнетушителями.



## **Источники механических травм**

Важное значение в трубопроводном строительстве имеет внедрение комплексной механизации и автоматизации, что значительно уменьшает опасность травм подобного рода. Основные причины травматизма при сборке и сварке на монтажной площадке: отсутствие грузоподъемных средств для подъема тяжелых деталей; неисправность такелажных приспособлений; неисправный инструмент — кувалды, молотки, гаечные ключи, зубила и т. п., отсутствие защитных очков при очистке швов от шлака; отсутствие спецодежды и других защитных средств. Меры безопасности в этом случае: все указанные средства необходимо периодически проверять; такелажные работы должны осуществлять лица, прошедшие специальный инструктаж; от рабочих необходимо требовать соблюдения всех правил техники безопасности, включая работу в спецодежде, брезентовых наплечниках для защиты шеи и плеч, рукавицах; использование средств индивидуальной вентиляции (где это необходимо) и т. д.

### **ОСОБЕННОСТИ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ СВАРКЕ И РЕЗКЕ НА СТРОИТЕЛЬНО- МОНТАЖНЫХ ПЛОЩАДКАХ**

При дуговой сварке в монтажных условиях особое внимание необходимо обращать на тщательную изоляцию токоведущих проводов, при сварке внутри металлических конструкций (трубопровод, резервуар) — на хорошую вентиляцию места сварки. Сварщики должны пользоваться резиновой подстилкой, хорошей спецодеждой. При работе в тесных местах, плохо проветриваемых, сварщики должны периодически выходить из трубопровода для отдыха, их пребывание внутри трубопровода должно подстраховываться подручными. Для переноски инструмента, электродов и других сварочных материалов, а также сбора электродных огарков необходимо использовать специальные инструментальные ящики или цилиндрические пеналы из негорючего материала. Не допускается разбрасывание электродных огарков на строительной площадке. Выполнение работ по сварке и резке на высоте разрешается с лесов, подмостей и люлек только после проверки этих устройств мастером или производителем работ. Леса и подмости изготовляют сплошными шириной не менее 1 м, с прочными и устойчивыми ограждениями. Допускается кратковременные работы выполнять с приставных лестниц, с упорами в виде металлических шипов, резиновых наконечников и других тормозных устройств. Верхние концы лестниц необходимо закреплять к прочным неподвижным конструкциям, а также предусматривать меры против случайного сдвига лестниц проходящими людьми и перемещающимися механизмами. При проведении работ в несколько ярусов требуется предусматривать устройство навесов и насти-

лов для защиты работающих внизу от капель расплавленного металла и шлака, а также от падения инструмента и других предметов. Во время работы на открытом воздухе при дожде сварку (резку) следует вести только при наличии соответствующих защитных устройств (тентов, навесов, козырьков и т. п.). Запрещается выполнять сварку и резку на высоте при гололеде или ветре более 6 баллов. В зимнее время сварщики и резчики, работающие на строительно-монтажной площадке, должны иметь возможность обогрева в непосредственной близости от рабочего места. При температуре от  $-20$  до  $-25^{\circ}\text{C}$  сварщику разрешается обогреваться в течение 10 мин через каждый час работы. В монтажных условиях целесообразно размещать сварочное оборудование в комплекте, расположенном ближе к месту проведения работ и легко транспортируемом кранами при смене места работы. Целесообразна также установка оборудования на стационарных энергоплощадках с дистанционным управлением. Эти меры снижают потери времени на различные переходы и уменьшают опасность производственного травматизма.

Для удобного и безопасного труда сварщика на монтажной площадке предусматривают дополнительные мероприятия. Сборку и сварку крупногабаритных секций (трубопроводов, резервуаров) следует выполнять на стендах, трубосварочных линиях. При сварке объемных секций на высоте (в виде полусфер шаровых резервуаров) необходимо устраивать леса с расположением сварочного оборудования вне рабочего места сварщика. Все оборудование, которое в неисправном состоянии может оказаться под напряжением, должно иметь индивидуальное заземление с выводом к общему защитному заземлению. Все сварочные установки должны находиться под наблюдением электромонтера, и устранением неполадок в работе занимается только он.

Для сварки с принудительным формированием шва меры техники безопасности общие, но, кроме этого, необходим тщательный контроль всех водяных коммуникаций ползуна, так как малейшее попадание влаги в шлаковую ванну приводит к мгновенному парообразованию, что способствует бурному выплеску шлака, приводя к тяжелым ожогам оператора. Процесс сварки в среде защитных газов, кроме соблюдения общих мер для всех способов сварки, обладает той особенностью, что углекислый газ в 1,5—2 раза тяжелее воздуха и газ может скапливаться в нижней части.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акулов А. И., Бельчук Т. А., Демянцевич В. П. Технология и оборудование сварки плавлением. М., Машиностроение, 1977.
2. Афанасьев В. А., Бобрицкий Н. В. Сооружение резервуаров для хранения нефти и нефтепродуктов. М., Недра, 1981.
3. Багрянский К. В., Добротина З. А., Хренов К. К. Теория сварочных процессов. Киев, Вища школа, 1976.
4. Бродский А. Я., Евстратов Г. И., Фридман А. М. Сварка арматуры железобетонных конструкций на строительной площадке. М., Стройиздат, 1978.
5. Евсеев Г. Б., Глизманенко Д. Л. Оборудование и технология газоплазменной обработки металлов и неметаллических материалов. М., Машиностроение, 1974.
6. Контроль качества сварки. Под ред. В. Н. Волченко. М., Машиностроение, 1975.
7. Лифшиц В. С., Литвинчук М. Д. Прессовые методы сварки магистральных и промышленных трубопроводов. М., Недра, 1970.
8. Николаев Г. А., Куркин С. А., Винокуров В. А. Расчет, проектирование и изготовление сварных конструкций. М., Высшая школа, 1971.
9. Патон Б. Е., Лебедев В. К. Электрооборудование для контактной сварки. М., Машиностроение, 1969.
10. Петров Г. Л., Тумарев А. С. Теория сварочных процессов. М., Высшая школа, 1977.
11. Походня И. К., Сунтель А. М., Шлепаков В. И. Сварка порошковой проволокой. Киев, Наукова думка, 1972.
12. Потапьевский А. Г. Сварка в защитных газах плавящимся электродом. М., Машиностроение, 1974.
13. Румянцев С. В., Добромислов В. А., Борисов О. И. Типовые методики радиационной дефектоскопии и защиты. М., Атомиздат, 1979.
14. Свиридова Т. А., Привалов Ю. А. Монтаж шаровых резервуаров. М., Стройиздат, 1980.
15. Современные способы сварки магистральных трубопроводов плавлением. А. Г. Мазель, В. Ф. Тарлинский, М. З. Шейкин и др. М., Недра, 1979.
16. Суворов А. Ф., Лялин К. В. Сооружение крупных резервуаров. М., Недра, 1979.
17. Таран В. Д. Сварка магистральных трубопроводов и конструкций. М., Недра, 1970.
18. Теоретические основы сварки. Под ред. В. В. Фролова. М., Высшая школа, 1970.
19. Технология и оборудование контактной сварки/ Б. Д. Орлов, Ю. В. Дмитриев, А. А. Чакалев и др. М., Машиностроение, 1975.
20. Технология и оборудование сварки плавлением/ Г. Д. Никифоров, Г. В. Бобров, В. М. Никитин и др. М., Машиностроение, 1978.
21. Технология электрической сварки металлов и сплавов плавлением. Под ред. Б. Е. Патона. М., Машиностроение, 1974.

## О Г Л А В Л Е Н И Е

|                                                                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Предисловие . . . . .                                                                                                         | 3  |
| <b>Глава 1. Основные способы сварки трубопроводов и резервуаров. Физические основы электрической сварочной дуги</b> . . . . . | 4  |
| Классификация основных способов сварки трубопроводов и резервуаров . . . . .                                                  | 4  |
| Технологические особенности сварки плавлением . . . . .                                                                       | 5  |
| Технологические особенности сварки давлением . . . . .                                                                        | 11 |
| Физические основы электрической сварочной дуги . . . . .                                                                      | 14 |
| <b>Глава 2. Источники питания для дуговой сварки</b> . . . . .                                                                | 19 |
| Особенности работы источников питания . . . . .                                                                               | 19 |
| Источники питания постоянного тока . . . . .                                                                                  | 23 |
| Источники питания переменного тока . . . . .                                                                                  | 30 |
| Энергопитание сварочных постов . . . . .                                                                                      | 33 |
| <b>Глава 3. Физико-металлургические процессы при сварке плавлением</b> . . . . .                                              | 35 |
| Способы передачи тепла . . . . .                                                                                              | 36 |
| Методы расчета распространения тепла от мгновенных сосредоточенных источников . . . . .                                       | 39 |
| Нагрев металла сварочной дугой . . . . .                                                                                      | 40 |
| Распространение тепла при односторонней сварке пластин встык . . . . .                                                        | 41 |
| Распространение тепла при сварке мощными быстро движущимися источниками . . . . .                                             | 42 |
| Нагрев и плавление электродного материала при дуговой сварке . . . . .                                                        | 45 |
| Тепловая эффективность и термический к. и. д. процесса проплавления . . . . .                                                 | 47 |
| Регулирование структурных изменений при сварке . . . . .                                                                      | 48 |
| Основные закономерности развития металлургических процессов . . . . .                                                         | 50 |
| Металлургические процессы при сварке плавлением . . . . .                                                                     | 53 |
| <b>Глава 4. Технологическая прочность сварных соединений</b> . . . . .                                                        | 62 |
| Горячие трещины . . . . .                                                                                                     | 62 |
| Определение технологической прочности металлов при сварке в процессе кристаллизации . . . . .                                 | 65 |
| Способы повышения технологической прочности сварных соединений . . . . .                                                      | 67 |
| Холодные трещины . . . . .                                                                                                    | 68 |
| Оценка технологической прочности стали в процессе превращений аустенита . . . . .                                             | 71 |
| Способы повышения сопротивляемости стали образованию холодных трещин . . . . .                                                | 72 |
| <b>Глава 5. Газопламенная и газoeлектрическая обработка металлов</b> . . . . .                                                | 74 |
| Свойства газового пламени и применяемые газы . . . . .                                                                        | 75 |
| Виды тепловой резки и обработки металлов . . . . .                                                                            | 77 |
| Оборудование и технология тепловой резки . . . . .                                                                            | 84 |
| <b>Глава 6. Материалы, используемые при сооружении трубопроводов и резервуаров</b> . . . . .                                  | 88 |
| Требования, предъявляемые к материалам трубопроводов и резервуаров . . . . .                                                  | 88 |
| Стали для трубопроводов и резервуаров . . . . .                                                                               | 90 |
| Материалы для выполнения сварочных работ . . . . .                                                                            | 93 |

|                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Глава 7. Сборка под сварку стыков труб и сборочные приспособления</b>               | 107 |
| Подготовка труб к сборке                                                               | 108 |
| Сборка труб под сварку                                                                 | 109 |
| Сборочные приспособления                                                               | 113 |
| Центраторы                                                                             | 117 |
| <b>Глава 8. Ручная электродуговая сварка</b>                                           | 129 |
| Особенности технологии и техники сварки неповоротных стыков трубопроводов              | 132 |
| Сварка трубопроводов из сталей повышенной и высокой прочности                          | 136 |
| Особенности технологии сварки трубопроводов, транспортирующих агрессивные среды        | 140 |
| Сварка термически упрочненных сталей                                                   | 142 |
| Специальные сварочные работы при монтаже трубопроводов                                 | 144 |
| <b>Глава 9. Сварка в среде защитных газов</b>                                          | 147 |
| Особенности процесса сварки в среде углекислого газа                                   | 147 |
| Сварка поворотных стыков трубопроводов                                                 | 150 |
| Оборудование для газозлектрической сварки поворотных стыков                            | 153 |
| Сварка неповоротных стыков на трассе                                                   | 156 |
| Оборудование для сварки неповоротных стыков в среде углекислого газа                   | 159 |
| <b>Глава 10. Автоматическая сварка под флюсом и с принудительным формированием шва</b> | 161 |
| Влияние параметров режима сварки под флюсом на форму сварных швов                      | 163 |
| Определение режимов сварки под флюсом                                                  | 167 |
| Способы выполнения сварных соединений под флюсом                                       | 173 |
| Автоматическая сварка с принудительным формированием шва                               | 181 |
| Оборудование для сварки под флюсом                                                     | 184 |
| <b>Глава 11. Полевые трубосварочные базы</b>                                           | 190 |
| Расположение полустационарных сварочных баз на трассе                                  | 191 |
| Оборудование трубосварочных баз                                                        | 192 |
| Полевые автосварочные установки                                                        | 205 |
| Конструктивные особенности трубосварочных баз                                          | 206 |
| Поворотная сварка секций труб                                                          | 212 |
| <b>Глава 12. Электроконтактная сварка трубопроводов</b>                                | 216 |
| Процесс стыковой сварки оплавлением                                                    | 216 |
| Устойчивость процесса оплавления                                                       | 219 |
| Энергетические затраты при электроконтактной сварке                                    | 222 |
| Нагрев и соединение свариваемых изделий                                                | 224 |
| Трубосварочные электроконтактные установки                                             | 226 |
| Технологический процесс электроконтактной сварки                                       | 228 |
| Оборудование электроконтактных установок                                               | 230 |
| <b>Глава 13. Сварка при отрицательных температурах</b>                                 | 237 |
| Влияние атмосферных условий на сварочный процесс                                       | 237 |
| Основные технологические мероприятия при сварке в зимних условиях                      | 242 |
| Применение сварочных материалов в зимнее время                                         | 246 |
| Сварочно-монтажные работы при сооружении трубопроводов и резервуаров                   | 249 |
| <b>Глава 14. Вертикальные резервуары и газгольдеры</b>                                 | 251 |
| Рулонный метод изготовления резервуаров и газгольдеров                                 | 251 |
| Монтаж и сварка резервуаров из рулонных заготовок                                      | 258 |
| Сварочные работы при листовой сборке резервуаров                                       | 264 |

|                                                                                             |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Глава 15. Сварка арматуры железобетонных конструкций</b>                                 | 274 |
| Ванная одноэлектродная сварка арматуры                                                      | 275 |
| Полуавтоматическая ванная сварка под флюсом                                                 | 277 |
| Полуавтоматическая сварка самозащитной проволокой                                           | 283 |
| Стыковая электроконтактная сварка арматуры                                                  | 284 |
| Электроконтактная сварка пересекающихся стержней                                            | 289 |
| <b>Глава 16. Контроль качества сварных соединений</b>                                       | 290 |
| Контроль качества материалов                                                                | 29  |
| Определение механических свойств сварных соединений                                         | 293 |
| Дефекты в сварных соединениях                                                               | 296 |
| Магнитнографический контроль                                                                | 297 |
| Контроль сварных соединений рентгеновским излучением                                        | 300 |
| Контроль сварных соединений гамма-излучением                                                | 306 |
| Ультразвуковая дефектоскопия сварных соединений                                             | 312 |
| Контроль непроницаемости сварных соединений                                                 | 315 |
| <b>Глава 17. Техника безопасности при проведении сварочных работ в монтажных условиях</b>   | 317 |
| Общие требования техники безопасности при сварке                                            | 318 |
| Особенности обеспечения безопасности при сварке и резке на строительных-монтажных площадках | 323 |
| Список литературы                                                                           | 325 |

ВСЕВОЛОД ЛЕОНИДОВИЧ БЕРЕЗИН,  
АНАТОЛИЙ ФЕДОРОВИЧ СУВОРОВ

## СВАРКА ТРУБОПРОВОДОВ И КОНСТРУКЦИЙ

Редактор издательства *Н. В. Сергеева*  
Переплет художника *В. Б. Строганова*  
Художественный редактор *В. В. Шутько*  
Технические редакторы *А. В. Трофимов, О. Ю. Трепенков*  
Корректор *А. А. Передерникова*  
ИБ № 5424

Сдано в набор 26.11.82. Подписано в печать 31.03.83. Т-08117. Формат 60×90<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Бумага типографская № 2. Гарнитура «Литературная». Печать высокая. Усл.-печ. л. 20,5. Усл. кр.-отт. 20,5. Уч.-изд. л. 21,52. Тираж 8000 экз. Заказ 215/9253—8. Цена 1 р. 10 к.

Ордена «Знак Почета» издательство «Недра», 103633, Москва, К-12,  
Третьяковский проезд, 1/19

Ленинградская типография № 4 ордена Трудового Красного Знамени Ленинградского объединения «Техническая книга» им. Евгении Соколовой Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 191126, Ленинград, Социалистическая ул., 14.