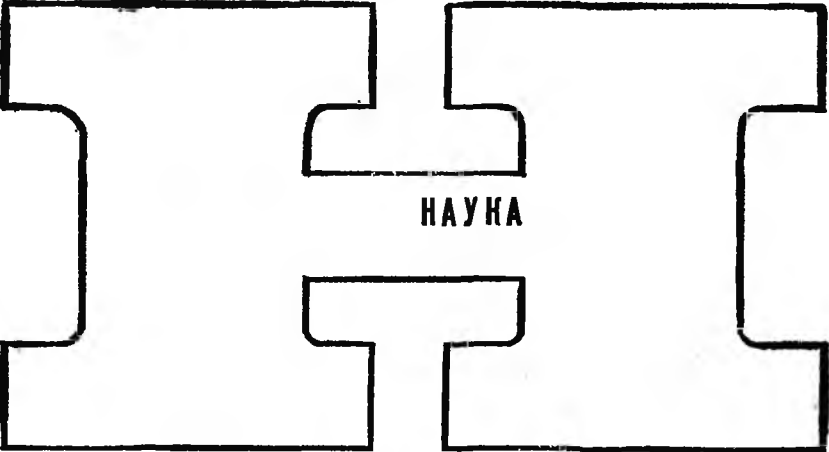


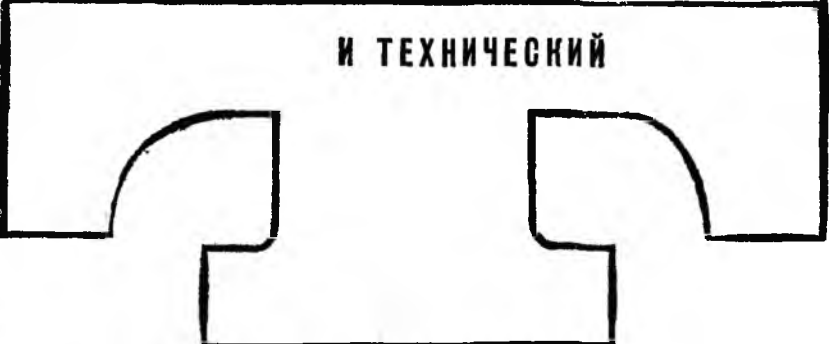
В. Э. МОРАВСКИЙ, Д. С. ВОРОНА



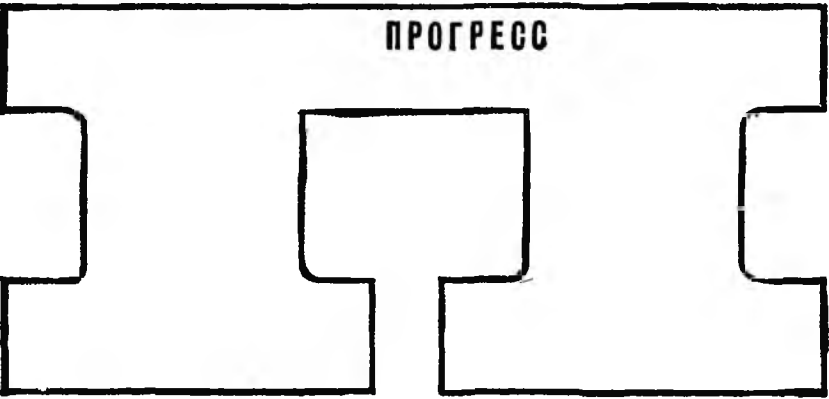
**ТЕХНОЛОГИЯ
И ОБОРУДОВАНИЕ
ДЛЯ ТОЧЕЧНОЙ
И РЕЛЬЕФНОЙ
КОНДЕНСАТОРНОЙ
СВАРКИ**



НАУКА



И ТЕХНИЧЕСКИЙ



ПРОГРЕСС

**АКАДЕМИЯ НАУК УКРАИНСКОЙ ССР
ИНСТИТУТ ЭЛЕКТРОСВАРКИ им. Е. О. ПАТОНА**

**В. Э. МОРАВСКИЙ
Д. С. ВОРОНА**

ТЕХНОЛОГИЯ И ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ТОЧЕЧНОЙ И РЕЛЬЕФНОЙ КОНДЕНСАТОРНОЙ СВАРКИ

Под редакцией
доктора технических наук
В. Э. Моравского



КИЕВ НАУКОВА ДУМКА 1985

УДК 621.791.76

Технология и оборудование для точечной и рельефной конденсаторной сварки / Моравский В. Э., Ворона Д. С. — Киев : Наук. думка, 1985. 272 с.

В монографии рассмотрены теоретические основы и технология точечной и рельефной конденсаторной сварки, а также описаны современное оборудование для этих процессов, его разновидности и типы соединений. Освещены вопросы стабильности процесса, свариваемости и повышения качества соединений, методики выбора режимов конденсаторной сварки. Изложены основы проектирования и наладки оборудования для нее. Даны рекомендации по внедрению этих процессов сварки в производство.

Для научных и инженерно-технических работников, занятых в области сварочного производства, приборостроительной, радиоэлектронной, машиностроительной и других отраслей промышленности. Может быть полезна преподавателям и студентам вузов соответствующих специальностей.

Ил. 103. Табл. 36. Библиогр.: с. 258—269 (288 назв.).

Рецензенты

С. И. Кучук - Яценко, В. Н. Корж

Редакция технической литературы

М $\frac{2704000000-318}{M221 (04)-85}$ 433-85

© Издательство «Наукова думка», 1985

ПРЕДИСЛОВИЕ

Конденсаторная сварка сопротивлением, в том числе точечная и рельефная, — это метод сварки металлов аккумулированной энергией, при котором их неразъемное соединение получается за счет выделения тепла во время прохождения сварочного тока (возникающего при использовании заранее накопленной в конденсаторах электрической энергии), через сопротивления сжатых в зоне контактирования свариваемых деталей [137, 142].

Разработанный около 50 лет тому назад в Советском Союзе [6] способ точечной конденсаторной сварки сопротивлением с использованием трансформированного разрядного тока электрического конденсатора начал широко применяться только с 1952 г. Тогда было установлено [133, 134], что основной областью его внедрения должно являться получение неразъемных микросварных соединений (т. е. из металлов толщиной до 0,5—0,7 мм и диаметром до 3—5 мм). Несколько позже нашли заметное применение точечная конденсаторная сварка металлов толщиной до 2,5—3 мм, а также шовная, рельефная и стыковая конденсаторная сварка сопротивлением. За последние 10—15 лет значительные успехи достигнуты и в развитии ударной стыковой конденсаторной сварки плавлением [93].

В 1954 г. впервые в мировой технике в нашей стране началось серийное производство точечных конденсаторных машин малой мощности [136, 144] для сварки металлов толщиной 0,02—0,5 мм, а в 1960 г. была опубликована первая монография в области конденсаторной сварки сопротивлением [135]. Данные дальнейших исследований были обобщены в работах [137, 142].

За последние 20 лет данный метод сварки непрерывно развивался, совершенствовался и все шире внедрялся. Это относится в первую очередь к точечной и рельефной конденсаторной сварке сопротивлением. В связи с этим возникла необходимость издания данной монографии, в которой освещено все то основное по точечной и рельефной конденсаторной сварке, что к настоящему времени накоплено в нашей стране, как ведущей в этой области, и в зарубежных странах [223, 239—246, 248—267, 269, 275—278, 283—288].

В данной монографии важное место занимают вопросы стабильности точечной и рельефной конденсаторной сварки, свариваемости, влияния на процесс сварки контактных и собственных сопротивлений зоны сварки, формы рабочих частей электродов, размеров их контактных поверхностей и др. Основное внимание уделено технологии и оборудованию для точечной и рельефной конденсаторной микросварки, которые широко внедрены на многих заводах приборостроения и радиоэлектроники (микросварка узлов электровакуумных, полупроводниковых, электрических, теплотехнических, оптических, коммутационных, гидрометеорологических, радиотехнических, измерительных, медицинских, бытовых и других приборов; объемных модулей, микросхем, радиокомпонентов и пр.). Здесь также освещены наиболее важные вопросы технологии сварки этими способами металлов толщиной 0,8—2,5 мм, выполняемой на отечественных машинах. При этом небезынтересно отметить тот факт, что к настоящему времени в нашей стране соотношение (по количеству единиц) между оборудованием для точечной и рельефной конденсаторной микросварки и машинами для этих же способов сварки металлов толщиной 0,8—2,5 мм составляет примерно 10 : 1. А это убедительно подтверждает то положение, что в настоящее время и в будущем основной областью применения этих способов конденсаторной сварки является получение микросварных соединений. Перспективным является также применение точечной и рельефной конденсаторной сварки металлов толщиной 0,8—3,0 мм.

Следует отметить, что в монографии основное место занимают результаты исследований и внедрения точечной и рельефной конденсаторной сварки, выполненных авторами в Институте электросварки (ИЭС) им. Е. О. Патона АН УССР. Кроме того, в ней приведены данные по изучению и внедрению этих способов сварки в таких организациях как ВНИИЭСО, НИАТ, МВТУ им. Н. Э. Баумана, МАТИ, РПИ и др.

Монография состоит из предисловия и восьми глав.

Предисловие, глава 1, параграфы 1 и 2 главы VI, параграф 1 главы VII, глава VIII (кроме параграфа 3) написаны В. Э. Моравским. Глава VII (кроме параграфа 1), параграф 1 и 2 главы II, параграф 4 главы III и параграф 3 главы VI написаны Д. С. Вороной. Остальной материал написан авторами совместно. В. Э. Моравским отредактирован весь текст монографии.

Авторы приносят глубокую благодарность рецензентам за ценные указания, позволившие улучшить изложенный в монографии материал. Критические замечания, пожелания и отзывы просят направлять по адресу: 252601, Киев 4, ул. Репина, 3, издательство «Наукова думка».

КОНДЕНСАТОРНАЯ СВАРКА — ПРОГРЕССИВНЫЙ МЕТОД СОЕДИНЕНИЯ МЕТАЛЛОВ

1. Сущность и способы

Конденсаторная сварка является наиболее известным и распространенным методом сварки аккумулированной энергией [142].

Сварка аккумулированной энергией — это технологический процесс, при котором сварное соединение металлических деталей осуществляется за счет джоулева тепла или тепла при дуговом разряде, выделяемых сварочным током, возникающим при использовании заранее накопленного количества (дозы) энергии. Кроме конденсаторной сварки в настоящее время известны еще пять методов сварки аккумулированной энергией [137, 142]: электромагнитная; аккумуляторная, или электрохимическая; кинетическая, или инерционная; электромагнитного поля и упругих элементов; энергией импульсного электрического генератора с подвижным индуктором. Однако ни один из этих методов практического применения почти не нашел, ввиду того что все они являются более сложными и менее эффективными, чем конденсаторная сварка.

Исторически сложилось так, что ранее [49] все методы сварки аккумулированной энергией относили к разновидностям электрической контактной сварки. Однако за последние годы в связи с разработкой нескольких новых способов сварки аккумулированной энергией [93], являющихся по их физической сущности разновидностями электрической дуговой сварки, этот термин стал несколько шире и уже не может быть отнесен только к контактной сварке. Естественно, что это в полной мере относится и к конденсаторной сварке как основному методу сварки аккумулированной энергией. В связи с изложенным выше уточненная [132] классификационная схема способов конденсаторной сварки металлов (рис. 1) хотя и выглядит несколько необычно [137, 142], но является наиболее современной и по своему построению точно соответствующей основному принципу всех способов сварки аккумулированной энергией. Последнее означает, что данная схема составлена таким образом, что к разновидностям конденсаторной сварки отнесены только такие, при которых энергия для их выполнения сначала накапливается (во время пауз между сварочными операциями), а затем расходуется на сварку

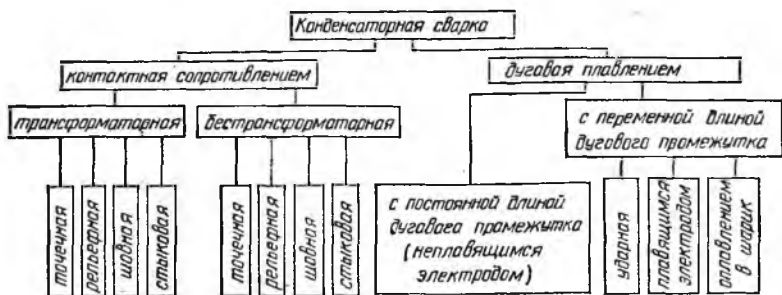


Рис. 1. Классификационная схема способов конденсаторной сварки металлов.

металлических деталей, но при неперемном условии, что перед этим рабочая аккумулирующая система (конденсаторная батарея) полностью отключается от питающего ее источника энергии¹ (электрической сети, генератора постоянного тока, буферной батареи конденсаторов).

В связи с этим принципиальная схема взаимосвязи аккумулирующей системы (рабочая батарея конденсаторов емкостью C_p , заряженная до напряжения U_c) с источником зарядки ИЗ и сварочным контуром СК (сварочной цепью) при всех способах конденсаторной сварки имеет вид, представленный на рис. 2, из которого ясно видно, что здесь энергия для выполнения каждой сварочной операции (правое положение коммутатора K) может и должна поступать только от заряженных конденсаторов.

Зарядка конденсатора C_p (левое положение K) до напряжения U_c обуславливает аккумулярование в нем энергии

$$W_k = \frac{C_p U_c^2}{2} \cdot 10^{-6}, \quad (I.1)$$

где W_k , Дж, если C_p , мкФ, а U_c , В.

Формула (I.1) показывает, что при конденсаторной сварке энергия W_k может регулироваться изменениями емкости конденсаторов и напряжения их зарядки, а также одновременно изменениями и емкости и напряжения. Все эти способы нашли практическое применение и по-разному реализованы во многих типах оборудования для конденсаторной сварки. Однако, как правило, в целях расширения технологических возможностей такого оборудования и в первую очередь при его универсальном назначении наиболее целесообразно регулировать как емкость конденсаторов, так и напряжение их зарядки.

¹ В связи с этим важным принципиальным положением неправильно относить к конденсаторной сварке металлов такие способы сварки, как резонансно-импульсная [179] и импульсом зарядного тока конденсаторов [137]. Это объясняется тем, что в первом из указанных способов конденсатор накапливает в себе энергию (через резонансную цепь) одновременно с потреблением от электрической сети и энергии на сварку, а во втором конденсатор является как бы саморезервателем проходящего через него зарядного (сварочного) тока [137].

Из классификационной схемы (см. рис. 1) следует, что необходимо различать два принципиально различных вида контактной конденсаторной сварки: бестрансформаторную сварку, когда конденсатор разряжается непосредственно на свариваемые детали, и трансформаторную сварку, когда конденсатор разряжается на первичную обмотку сварочного трансформатора, а свариваемые детали находятся во вторичной его цепи.

В свою очередь бестрансформаторная конденсаторная сварка может осуществляться двумя способами: сопротивлением и плавлением. Контактная трансформаторная конденсаторная сварка обычно выполняется как сварка сопротивлением.

Прежде чем перейти к рассмотрению каждого из всех известных в настоящее время способов конденсаторной сварки, необходимо отметить следующее.

Первым ее способом, разработанным в 1877 г. физиком Э. Томсоном, является стыковая контактная сварка сопротивлением. Однако открытие этого способа сварки [49] было связано с тем, что его изобретатель пришел к данной идее не теоретически, а при исследованиях разряда лейденской банки (конденсатора). При этом случайно приведенные в соприкосновение (контактирование) торцовые поверхности концов двух проволок оказались благодаря выделению при разряде конденсатора джоулевого тепла расплавленными и сварились между собой встык.

Вторым исторически возникшим способом конденсаторной сварки следует, безусловно, считать стыковую ударную конденсаторную сварку плавлением, разработанную в 1905 г. [93]. Однако сложность механизма, осуществлявшего сближение, разведение и вторичное сближение свариваемых деталей (в течение необходимых здесь нескольких тысячных долей секунды), и малая энергия, которую можно было накопить в практически разумном количестве существовавших в то время конденсаторов, резко ограничивали применение этого способа стыковой сварки проволок малых сечений и в таком виде он практического применения почти не нашел.

В дальнейшем А. Ванг [93] заменил в указанном выше способе конденсаторы низкого напряжения более высоковольтными, при которых оказался возможным пробой довольно значительных воздушных промежутков между концами стыкуемых проволок. Благодаря этому изменился метод возбуждения дуги при разряде конденсаторов и отпала необходимость в предварительном контактировании и последующем разведении стыкуемых проволок. При этом механизм соударения (осадки) деталей получил довольно простую форму, что в целом обусловило преимущество применения схемы стыковой ударной конденсаторной сварки плавлением А. Ванга.

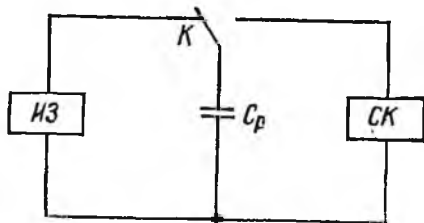


Рис. 2. Принципиальная схема взаимосвязи аккумуляторной системы C_p с источником зарядки и сварочным контуром при всех способах конденсаторной сварки.

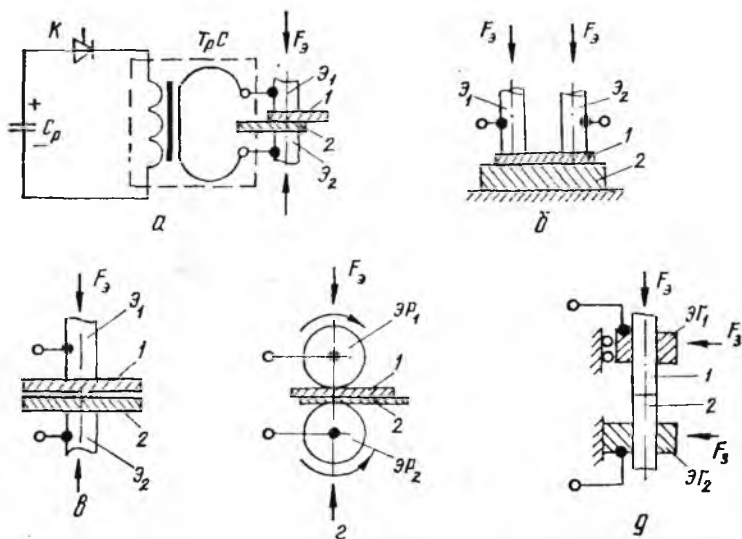


Рис. 3. Схемы трансформаторной конденсаторной сварки сопротивлением: а — точечная двусторонняя; б — точечная односторонняя; в — рельсно-точечная; г — шовная; д — стыковая.

Однако ни стыковая конденсаторная сварка сопротивлением, ни стыковая ударная конденсаторная сварка плавлением, несмотря на их заметное практическое применение (в первую очередь в радиоэлектронике и приборостроении), не являются столь широко внедренными в различных отраслях промышленности, как изобретенная в 1934 г. советским ученым Г. И. Бабагом [6, 247] точечная конденсаторная сварка сопротивлением, интенсивное внедрение которой началось в нашей стране с середины 50-х годов [133—137]. Если к этому добавить, что за ряд последних лет советскими учеными были разработаны еще несколько новых способов конденсаторной сварки, то можно с уверенностью сказать, что благодаря всем этим изобретениям, а также комплексным исследованиям различных способов конденсаторной сварки, разработке технологии и оборудования, его серийному производству (в первую очередь универсального назначения) и широкому внедрению наша страна в настоящее время занимает первое место в мире по созданию и объемам применения в целом различных прогрессивных способов конденсаторной сварки металлов.

В частности, можно отметить, что если к началу 50-х годов в нашей стране в приборостроении и радиоэлектронике точечная конденсаторная сварка металлов малых толщин и сечений совершенно не применялась, то в настоящее время объемы ее внедрения здесь весьма существенны, о чем достаточно убедительно свидетельствует тот факт, что в этих отраслях промышленности точечные конденсаторные машины малой мощности составляют более чем 35 % общего количества машин для точечной контактной микросварки. Такого положительного примера нет ни в одной из зарубежных стран. Ниже

рассматриваются принципиальные схемы различных способов конденсаторной сварки, причем сначала относящиеся к разновидностям контактной сварки сопротивлением, затем к дуговой сварке плавлением и, наконец, к дуговым способам сварки оплавлением (см. рис. 1).

При точечной трансформаторной конденсаторной сварке сопротивлением (рис. 3, а) вентилем K производится разряд конденсатора C_p на первичную обмотку сварочного трансформатора TrC . Тогда во вторичной его обмотке, которая обычно состоит из одного витка, индуцируется импульс тока, сваривающий между собой в одной точке предварительно сжатые между электродами $\mathcal{E}_1$ — $\mathcal{E}_2$ усилием F_a металлические детали 1 и 2. Такая схема соответствует способу двустороннего подвода сварочного тока к соединяемым деталям. По схеме, показанной на рис. 3, б, этот ток подводится с одной стороны (также электродами $\mathcal{E}_1$ и $\mathcal{E}_2$). По схемам, приведенным на рис. 3, а, б, можно выполнять не только одно- и двухточечные, но также многоточечные сварные соединения.

Рельефно-точечная трансформаторная конденсаторная сварка сопротивлением (рис. 3, в), являющаяся разновидностью точечной конденсаторной сварки (см. рис. 3, а и 3, б), может выполняться только при условии, если на одной из свариваемых деталей (например, на детали 1) предварительно формируются (обычно штамповкой) один или несколько точечных рельефов, которые при протекании через них импульса сварочного тока служат концентраторами тепловыделения.

При рельефно-контурной трансформаторной конденсаторной сварке сопротивлением концентраторами тепла являются рельефы, выполняемые по замкнутому контуру в виде кольца, эллипса, квадрата, прямоугольника и др.

Шовная трансформаторная конденсаторная сварка сопротивлением (рис. 3, г) выполняется благодаря периодической с заданной по режиму частотой дозированной зарядке (через вентиль) конденсаторов C_p и их последующему разряду (через другой вентиль и сварочный трансформатор) на сжатые и перемещающиеся между электродами-роликами $\mathcal{E}P_1$ и $\mathcal{E}P_2$ свариваемые детали. Изменяя емкость C_p , напряжение ее зарядки, размеры и шаг точек, а также усилие сжатия роликов F_a , можно подобрать требуемый режим шовной сварки сопротивлением и получить заданную длину сварного шва. В частности, если герметичность сварных швов не требуется, то точки могут не перекрываться и тогда имеет место прерывистая шовная трансформаторная конденсаторная сварка [137]. Наконец, возможна также шаговая [137] шовная трансформаторная конденсаторная сварка сопротивлением, при которой производится периодическая (с заданной по режиму сварки частотой) кратковременная остановка вращения электродов-роликов перед пропуском через детали импульсов сварочного тока.

При стыковой трансформаторной конденсаторной сварке сопротивлением (рис. 3, д) свариваемые детали закрепляются (усилием F_a) в электродах-губках $\mathcal{E}G_1$ и $\mathcal{E}G_2$ машины, сближаются до сопри-

косновения по всей стыкуемой поверхности и сжимаются усилием $F_{\text{ж}}$. Затем импульс тока сваривает эти детали в месте их стыка.

Бестрансформаторная контактная конденсаторная сварка сопротивлением разработана В. Э. Моравским в 1960 г. [129]. Схемы точечной, рельефной, стыковой и шовной бестрансформаторной сварки [137] сходны с описанными выше схемами трансформаторной конденсаторной сварки сопротивлением, но отличаются от них отсутствием сварочного трансформатора и в связи с этим разрядом конденсатора C_p непосредственно на свариваемые детали, сжатые между электродами (роликами, губками). Благодаря этому здесь сравнительно простыми средствами возможно получение весьма кратковременных (менее 1 мс) импульсов сварочного тока. Этот способ конденсаторной сварки еще не нашел заметного применения, однако он перспективен для получения соединений из металлов очень малых толщин (до 0,1—0,2 мм).

В отличие от описанных выше способов контактной конденсаторной сварки сопротивлением дуговая конденсаторная сварка плавлением [137] характеризуется в первую очередь тем, что здесь источником тепла является электрическая дуга, горящая при разряде конденсаторов и расплавляющая свариваемые детали. В настоящее время наиболее широко применяемым способом дуговой конденсаторной сварки плавлением, используемым для получения стыковых соединений из металлов малых сечений (примерно до 80 мм²), является ударная конденсаторная сварка. При этом способе процесс получения неразъемного стыкового соединения из металлических деталей происходит под воздействием ударной механической нагрузки, которая прилагается либо во время либо непосредственно после окончания дугового разряда конденсаторов, расплавляющего на небольшую глубину стыкуемые детали.

Разновидности этого процесса [93] отличаются главным образом по методам возбуждения дуги и способам приложения ударной нагрузки. Принципиальная схема наиболее распространенной в настоящее время разновидности ударной конденсаторной сварки плавлением показана на рис. 4. Здесь конденсатор C_p сначала (в левом положении коммутатора K) заряжается от источника постоянного (выпрямленного) тока, а затем (в правом положении K) на свариваемые детали 1 и 2 подается напряжение U_c конденсатора C_p , причем первая из этих деталей неподвижная, а вторая может перемещаться в направляющих (под действием сжатой пружины 3). Если освободить защелку (на схеме не показана), удерживающую деталь 2, то под действием усилия сжатия пружины 3 эта деталь быстро перемещается по направлению к детали 1 и ударяется об нее (отсюда название способа — ударная сварка). Перед соударением свариваемых деталей возникает мощный дуговой разряд за счет энергии, накопленной в конденсаторе. При этом на обеих деталях происходит оплавление стыкуемых участков, которые после соударения деталей и охлаждения зоны соединения свариваются между собой встык.

Таким образом, в этом способе и в других разновидностях ударной конденсаторной сварки [93] используются достоинства нагрева

высококонцентрированным источником тепла при стабильности его энергии в сочетании с особенностями соединения металлов в пластическом состоянии под воздействием ударной механической нагрузки.

Ниже приведены краткие описания нескольких способов конденсаторной сварки, являющихся разновидностями основного метода сварки металлов — электродугового.

Первым из таких способов следует назвать дуговую конденсаторную сварку «оплавлением в шарик» [137, 142]. Здесь (рис. 5) один полюс (положительный) подключается к металлическому зажиму 3, с закрепленными в нем концами свариваемых проводов, а второй — к угольному электроду Э. Для регулирования сварочного тока здесь используется дроссель Dp . После зарядки конденсатора (левое положение коммутатора K) угольный электрод сближают с проводами, затем его отрывают, возникающий при этом мощный разряд (за счет энергии разряжаемого конденсатора) оплавляет концы проводов. Кристаллизация образовавшейся капли жидкого металла обуславливает образование сварного соединения шарообразной формы.

Разработанный в 1963 г. в ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР способ дуговой конденсаторной сварки неплавящимся неподвижным электродом [93, 137] полностью лишен основного недостатка способа «оплавлением в шарик», заключающегося в том, что в последнем при отрыве угольного электрода (после его закорачивания со свариваемыми деталями) весьма трудно обеспечить практическое постоянство длины дуги и времени контакта угольного электрода и свариваемого изделия, что нарушает стабильность процесса оплавления концов проводов.

В более прогрессивном способе дуговой конденсаторной сварки плавлением неплавящимся электродом (рис. 6) электрод Э (обычно вольфрамовый) в процессе сварки остается неподвижным. Между ним и свариваемыми деталями 1 и 2 устанавливают дуговой промежуток (в пределах 1—3 мм), а поскольку он не может быть пробит при атмосферном давлении напряжением зарядки конденсатора

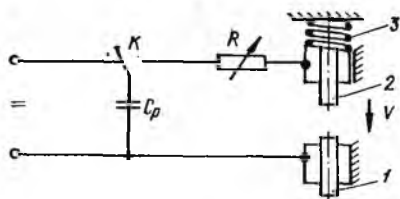


Рис. 4. Принципиальная схема наиболее распространенной разновидности ударной конденсаторной сварки плавлением (R — добавочное сопротивление).

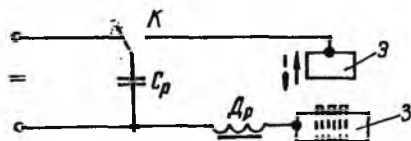


Рис. 5. Принципиальная схема дуговой конденсаторной сварки «оплавлением в шарик».

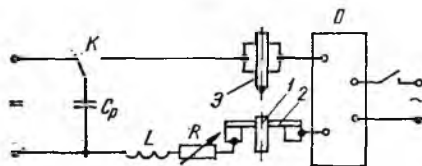


Рис. 6. Принципиальная схема способа дуговой конденсаторной сварки плавлением неподвижным неплавящимся электродом.

до 500 В (которое является еще технологически допустимым), то разряд C_p инициируется осциллятором O . Сварочный ток при этом способе регулируется реостатом R и индуктивностью L , а сам процесс сварки может осуществляться как в защитной среде, так и в воздушной.

2. Основные преимущества конденсаторной сварки

Конденсаторная сварка обладает рядом важных достоинств. Энергетическим преимуществом этого способа сварки является прежде всего менее значительная по сравнению с однофазными контактными машинами [223] мощность, потребляемая от сети при зарядке конденсаторов (табл. 1). Так, для точечной сварки латуни толщиной $0,7 \pm 0,7$ мм нужна однофазная контактная машина мощностью 25—30 кВ·А, а для конденсаторной — только 0,6—0,8 кВ·А, при толщине 2 ± 2 мм соответственно 45—105 и 20—25 кВ·А.

Указанное преимущество конденсаторной сварки объясняется тем, что здесь обычным является следующее неравенство между временами зарядки t_z и разряда t_p конденсаторов:

$$t_z \gg t_p, \quad (1.2)$$

так как зарядка рабочей батареи конденсаторов происходит в течение пауз между двумя сварочными операциями, которые часто больше нескольких долей секунды, а разряд конденсаторов происходит в течение сотых, тысячных и даже десятитысячных долей секунды.

При бестрансформаторной конденсаторной сварке сопротивление в цепи разряда конденсатора R_p обычно значительно меньше сопротивления в цепи его зарядки R_z и имеет место зависимость

$$I_p \gg I_z. \quad (1.3)$$

Разрядный ток в начальный момент разряда конденсатора мгновенно достигает значения

$$I_{p \max} = \frac{U_c}{R_p}. \quad (1.4)$$

Таблица 1. Значения средней потребляемой мощности однофазных и конденсаторных машин, кВ·А, при точечной сварке латуни Л63

Толщина панета, мм	Однофазные	Конденсатор- ные
0,3+0,3	5—10	0,3
0,5+0,5	15—20	0,4—0,5
0,7+0,7	25—30	0,6—0,8
1,0+1,0	30—80	3—5
1,5+1,5	35—90	5—20
2,0+2,0	45—105	20—25

Спадение разрядного тока до нулевого значения происходит по такому закону:

$$i_p = I_{p \max} e^{-\frac{t}{R_p C_p}} = \frac{U_c}{R_p} e^{-\frac{t}{R_p C_p}}. \quad (1.5)$$

Из формул (1.4), (1.5) видно, что, разряжая конденсатор на малое сопротивление, можно получить кратковременные им-

пульсы разрядного тока весьма большого значения. Это используется в конденсаторных машинах, работающих без сварочного трансформатора.

При различных способах трансформаторной конденсаторной сварки большие значения сварочного тока $i_{св}$ получают благодаря трансформированию разрядного тока конденсатора. Здесь допустима [65, 137] зависимость

$$i_{св} = k_t i_p, \quad (1.6)$$

где k_t — коэффициент трансформации сварочного трансформатора, равный отношению числа витков первичной w_1 и вторичной w_2 обмоток.

Величину i_p называют первичным (i_1), а $i_{св}$ — вторичным (i_2) токами конденсаторных машин.

Средняя мощность, забираемая от источника выпрямленного (или постоянного) тока при зарядке конденсатора, определяется по формуле

$$P_s = \frac{W_s}{t_s}, \quad (1.7)$$

где W_s — энергия, затрачиваемая на зарядку конденсатора.

Выражение для средней импульсной мощности при разряде конденсатора имеет вид

$$P_p = \frac{W_p}{t_p}. \quad (1.8)$$

Тогда, если, например, КПД зарядки $\eta_s = 0,5$, то из формул (1.7) и (1.8) можно получить

$$P_p = b_s \frac{t_s}{2t_p}. \quad (1.9)$$

Это выражение показывает, что при $\eta_s = 0,5$ средняя мощность при разряде конденсаторов во столько раз больше средней мощности при их зарядке, во сколько раз t_s больше $2t_p$.

Наряду с энергетическими достоинствами конденсаторная сварка имеет ряд технологических преимуществ.

1. При неизменных для данного режима сварки значениях C_p и U_c , как это видно из формулы (1.1), в конденсаторах накапливается вполне определенное и точно контролируемое при каждой сварочной операции количество электрической энергии.

Строгая дозировка накапливаемой в конденсаторах и расходуемой на сварку электрической энергии обуславливает при прочих равных условиях расплавление вполне определенного объема металла, что позволяет получать соединения стабильного качества. Это же преимущество играет существенную роль при анализе других причин, нарушающих стабильность сварки.

2. Возможность точного дозирования накопленной в конденсаторах энергии и получения практически любых малых ее количеств имеет важное значение для получения высококачественных сварных соединений из металлов очень малых толщин и диаметров (вплоть до тысячных долей миллиметра).

3. Весьма незначительное время процесса конденсаторной сварки (довольно часто это тысячные и десятитысячные доли секунды) и высокие плотности сварочного тока способствуют концентрированному выделению тепла в местах сварки металлических деталей (скорости нагрева металла составляют сотни тысяч и более градусов в секунду) [137, 142], что обеспечивает минимальную зону термического влияния [142], ширина которой составляет 0,1—0,5 (нередко и менее) толщины или диаметра свариваемого металла; получение соединений, расположенных рядом с теплочувствительными элементами, с хорошим внешним видом (без их дополнительной обработки после сварки) и с высокими прочностными характеристиками; минимальную пластическую деформацию металла зоны сварки, что позволяет выполнять соединения в непосредственной близости от края деталей и рядом с отверстиями; возможность получать неразъемные соединения металлических деталей при огромной разнице в их толщине или диаметрах (например, 10 000 : 1 и намного больше), а также при их различных теплофизических свойствах.

4. Возможность получения на конденсаторных машинах простыми средствами различных по форме импульсов сварочного тока, что обеспечивает высокое качество соединений из разнородных и трудносвариваемых металлов и сплавов.

5. Значения электрических параметров режима сварки, определяющих амплитуду, длительность и форму импульса сварочного тока, довольно легко воспроизводятся и контролируются.

6. Ударная конденсаторная сварка характеризуется такими достоинствами, как наличие высококонцентрированного дугowego источника тепла и выполнение процесса сварки металлов в их пластическом состоянии под действием ударной нагрузки. Качество получаемых соединений [93] во многом не зависит от состояния стыкуемых поверхностей (наличие на них естественных оксидных пленок, искусственно нанесенных металлических или электропроводных оксидных покрытий, а также различных загрязнений, если их толщина не более 0,05 мм, вполне допустимо).

7. Благодаря незначительному времени конденсаторной сварки при относительно большой паузе между сваркой двух точек повышаются стойкость и срок службы электродов при их воздушном (естественном) охлаждении.

8. Кратковременность процесса конденсаторной сварки и высокая стабильность качества сварных соединений позволяют создавать высокопроизводительное, в том числе автоматическое оборудование.

Все перечисленные выше технологические, а также в определенной мере и энергетические преимущества конденсаторной сварки в значительной мере способствовали ее широкому внедрению в различных отраслях техники, причем объем применения особенно велик в приборостроении и радиоэлектронике.

ОСНОВЫ ПРОЦЕССА КОНДЕНСАТОРНОЙ СВАРКИ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

1. Зарядка конденсаторов

В точечных и рельефных конденсаторных сварочных машинах зарядка конденсаторов C_p осуществляется выпрямительными устройствами (рис. 7), которые содержат вентили $V1$, токоограничивающие элементы Z , управляемые вентили $V2$ и зарядный трансформатор $Tr3$ (если устройство не питается непосредственно от источника переменного синусоидального напряжения) [135, 179, 186]. Процесс зарядки C_p в большинстве случаев протекает в течение ряда полупериодов напряжения сети. Наибольшее распространение в конденсаторных машинах малой и средней мощности получила однофазная двухполупериодная мостовая схема (рис. 7, а) выпрямительного устройства. Здесь начало зарядки конденсаторов C_p происходит в момент отпирания $V2$ (тиристор, симистор), а окончание — когда наступает равенство напряжения на конденсаторах C_p с напряжением срабатывания порогового элемента (на рисунке не показан) и сигнал управления отключает $V2$.

В машинах средней мощности для зарядки конденсаторов используются выпрямители $V1$, собранные по мостовой однофазной схеме с управляемыми [17, 57, 179, 186] вентилями $V2$ (рис. 7, б). Такая схема обеспечивает зарядку конденсаторов C_p практически одинаковым током путем изменения угла включения управляемого вентиля $V2$. В начале процесса зарядки обычно этот угол близок к нулю, затем после прохождения каждого очередного полупериода питающего напряжения он увеличивается по заданному закону.

Для зарядки конденсаторов C_p в машинах большой мощности используются трехфазные мостовые схемы (рис. 7, в).

В качестве токоограничивающих элементов однофазных и трехфазных зарядных устройств применяют [16—18, 57, 135, 186] омические R_s , емкостные C_s и индуктивные L_s сопротивления при включении этих элементов на стороне переменного тока и в основном R_s при включении этих элементов на стороне выпрямленного напряжения.

Зарядные устройства с токоограничивающими реакторами на стороне выпрямленного напряжения не нашли применения из-за трудностей стабилизации значений предзарядного напряжения

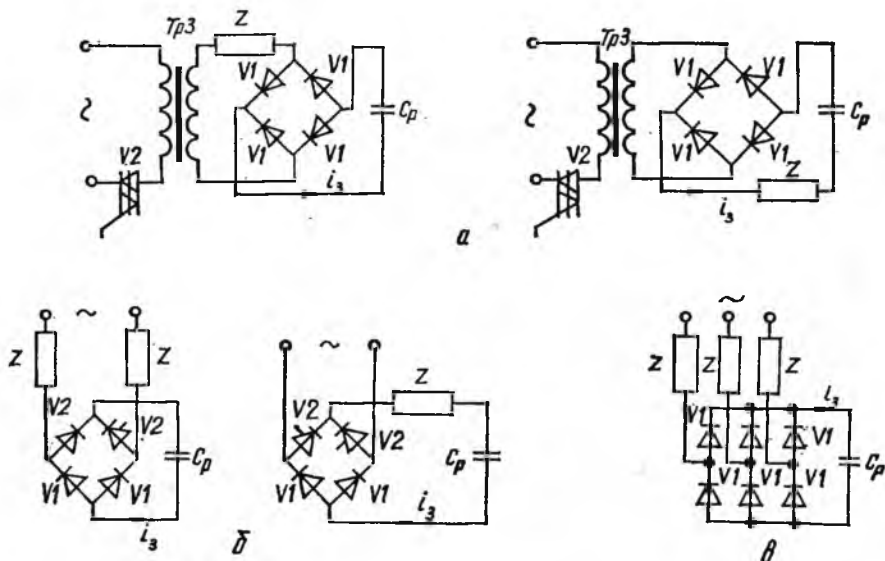


Рис. 7. Схемы зарядных устройств точечных и рельефных конденсаторных машин.

конденсаторов C_p на заданном уровне и некоторых других недостатков [186].

При зарядке конденсаторов C_p от источника постоянного напряжения U через омический токоограничивающий элемент R_s и нулевых начальных условиях ($t = 0$; напряжение на конденсаторах $u_c = 0$)

$$u_c = U \left(1 - e^{-\frac{t_3}{R_s C_p}} \right); \quad (II.1)$$

$$i_3 = \frac{U}{R_s} e^{-\frac{t_3}{R_s C_p}}, \quad (II.2)$$

т. е. как u_c , так и зарядный ток i_3 за время зарядки t_3 изменяются по экспоненциальному закону.

В большинстве зарядных устройств с токоограничивающими элементами в процессе зарядки конденсаторов изменяются величина и длительность тока i_3 (рис. 8), а сам процесс носит прерывистый характер [17, 186]. Например, в двухполупериодной схеме с омическим токоограничивающим элементом на стороне переменного тока зарядный ток на каждом из полупериодов зарядки протекает лишь на интервале времени, когда напряжение сети u больше напряжения u_c на конденсаторах. По мере зарядки конденсаторов C_p момент отпирания вентилей сдвигается вправо относительно начала полувольты синусоиды на определенный угол, а момент их записания — влево относительно конца этой полувольты [17, 186].

Указанные особенности обуславливают сложный вид функции $u_c(t)$, что затрудняет получение точного аналитического решения

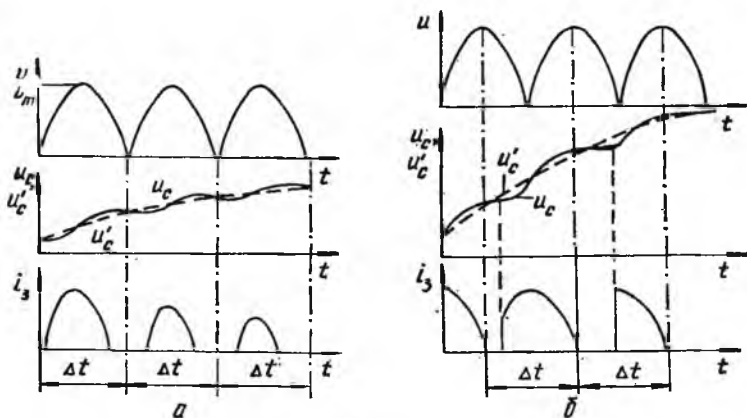


Рис. 8. Кривые $u(t)$, $u_c(t)$, $u'_c(t)$ и $i_z(t)$ при зарядке конденсаторов в двухполупериодной мостовой схеме с токоограничителем:

$a - R_z$; $b - C_z$.

процесса зарядки. Вместе с тем для анализа и особенно расчета зарядных цепей важно знать общий характер возрастания функции $u_c(t)$.

В работе [186] развит и обобщен метод усредненных кривых зарядки, являющийся в настоящее время основным при анализе переходных процессов и расчете зарядных цепей. Усредненной кривой зарядки $u_c(t)$ или усредненным значением функциональной зависимости напряжения на конденсаторах от времени в процессе зарядки является [186] гладкая, монотонная в строгом смысле функция, имеющая конечное или бесконечное число монотонных и непрерывных производных на каждом из интервалов зарядки и пересекающаяся с истинной функцией $u_c(t)$ в строго определенные равноотстоящие моменты времени Δt (см. рис. 8), выбираемые в зависимости от типа зарядной цепи. Например, для двухполупериодной мостовой схемы с омическим токоограничивающим элементом R_z моменты времени Δt соответствуют моментам прохождения напряжения сети через нуль, а для той же схемы, но с емкостным токоограничивающим элементом C_z — моментам прохождения напряжения сети через максимум [186].

Для последнего случая закон изменения u_c на батарее рабочих конденсаторов можно представить в виде [17]

$$u_c = U_m [1 - (1 - k)^{\frac{\omega t}{\pi}}], \quad (\text{II.3})$$

где

$$k = \frac{2C_z}{C_z + C_p}. \quad (\text{II.4})$$

Методы получения уравнения и вычисления усредненной кривой зарядных емкостных накопителей энергии рассмотрены в работах [17, 186].

В конденсаторных сварочных машинах КПД зарядных устройств определяется по формуле

$$\eta_3 = \frac{W_K}{W_3}. \quad (II.5)$$

Для схем с токоограничивающими элементами C_a , L_a значение η_3 близко к единице, а в схемах с R_a оно не превышает 0,5 [17, 135, 179, 186] из-за потерь в резисторах. Однако при использовании омических токоограничителей отсутствуют значительные броски тока при включении зарядных устройств и, следовательно, нет перенапряжений на вентилях, которые наблюдаются в схемах с реактивными токоограничивающими элементами при несинхронном включении зарядных устройств [186].

Следует также учитывать, что потери в резисторах относительно невелики. Так, при точечной конденсаторной сварке металлов толщиной до 0,5 + 0,5 мм и производительности сварки, равной 1000 точек/ч, суммарные потери электроэнергии за рабочую смену составляют 0,2—0,3 кВт · ч. Эти факторы, а также малая стоимость, большая номенклатура серийных резисторов способствуют широкому применению этих токоограничителей и в мощных конденсаторных сварочных машинах. В настоящее время в конденсаторных машинах (особенно малой и средней мощности) в большинстве случаев используют реактивные токоограничивающие элементы, которые наряду с экономией электроэнергии позволяют исключить дополнительный нагрев элементов схемы блока управления. Для защиты вентилях (если последние выбраны не на максимальное значение переходного режима) применяется синхронизация включения зарядных устройств с сетью [157, 186].

2. Разряд конденсаторов

Процесс разряда конденсатора для первичного и вторичного контуров машины (рис. 9, а) при трансформаторной конденсаторной сварке сопротивлением описывается уравнениями

$$i_1 R_1 + L_1 \frac{di_1}{dt} + M \frac{di_2}{dt} - u_c = 0; \quad (II.6)$$

$$i_2 R_2 + L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_1}{dt} = 0, \quad (II.7)$$

где R_1 — активное сопротивление первичной обмотки сварочного трансформатора TrC ; R_2 — активное сопротивление вторичной цепи сварочной машины ($R_2 = R_{20} + R_{c.k} + R_{a.c}$), включающее сопротивления R_{20} вторичной обмотки трансформатора, $R_{c.k}$ сварочного контура, $R_{a.c}$ зоны сварки; L_1 — индуктивность первичной обмотки трансформатора ($L_1 = L_{10} + L_{1s}$), включающая индуктивности L_{10} , обусловленную основным потоком намагничивания трансформатора, и L_{1s} — рассеяния; L_2 — индуктивность вторичной цепи сварочной машины ($L_2 = L_{20} + L_{2s}$), включающая индуктив-

ности L_{20} , обусловленную основным потоком намагничивания трансформатора, и L_{2s} — рассеяния; M — коэффициент взаимной индукции обмоток сварочного трансформатора,

$$M = \sqrt{L_{10}L_{20}}; u_c = U_c(0) - \frac{1}{C_p} \int_0^t i_1 dt;$$

$U_c(0)$ — напряжение на емкости C_p в начальный момент.

Исследованию процесса разряда конденсатора при трансформаторной конденсаторной сварке сопротивлением посвящен ряд работ [6, 23, 65, 66, 82, 179, 183].

В работе [6] показано, что решение уравнений (II.6) и (II.7) связано с крайне трудоемким определением

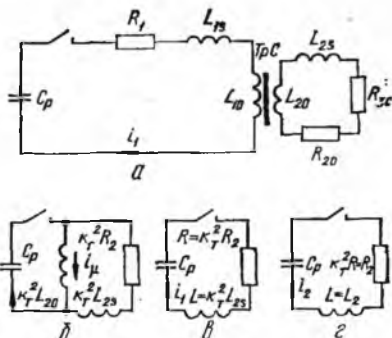


Рис. 9. Схемы разрядной цепи (а) и замещения (б—г) при трансформаторной конденсаторной сварке сопротивлением.

корней характеристического уравнения третьего порядка

$$p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0, \quad (\text{II.8})$$

где

$$a_1 = \frac{R_2 L_1 + R_1 L_2}{L_1 L_2 - M^2}; \quad a_2 = \frac{R_1 R_2 + \frac{L_2}{C_p}}{L_1 L_2 - M^2};$$

$$a_3 = \frac{R_2}{C_p (L_1 L_2 - M^2)}. \quad (\text{II.9})$$

На основе классического метода интегрирования в работе [23] дано наиболее полное решение линейных дифференциальных уравнений (II.6) и (II.7) в общем виде.

Для сокращения вычислений при определении корней характеристического уравнения (II.8) можно привести к виду [187]

$$\frac{a_1 a_3}{a_2^2} - \frac{a_3^2}{a_2^3} x = \frac{x - 1}{x^2}. \quad (\text{II.10})$$

Тогда действительные корни уравнения равны абсциссам точек пересечения кривой (правая часть уравнения (II.10)) и прямой (левая часть этого же уравнения). Для определения корней необходимо на осях ординат и абсцисс отложить соответственно отрезки $N = \frac{a_1 a_3}{a_2^2}$ и $T = \frac{a_1 a_2}{a_3}$, а затем соединить их концы прямой (рис. 10).

При колебательном разряде конденсаторов, который часто наблюдается в машинах для конденсаторной сварки сопротивлением, характеристическое уравнение имеет один действительный корень

$$p_1 = -\alpha \quad (\text{II.11})$$

и два сопряженных комплексных

$$p_2 = -\gamma + j\omega; \quad p_3 = -\gamma - j\omega, \quad (\text{II.12})$$

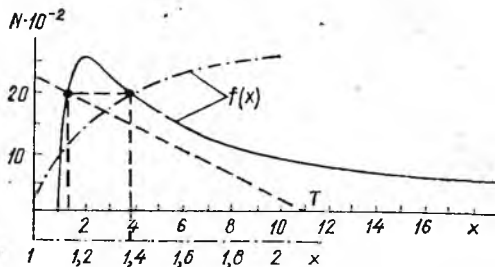


Рис. 10. График для нахождения действительных корней характеристического уравнения.

где [183]

$$\alpha = \frac{a_3}{a_2} x; \quad \gamma = \frac{a_1 - \alpha}{2};$$

$$\omega = \sqrt{\frac{a_3}{\alpha} - \gamma^2}. \quad (\text{II.13})$$

При аperiодическом разряде конденсаторов все три действительных корня характеристического уравнения определяются по формуле [183]

$$p_{1,2,3} = -\frac{a_3}{a_2} x_{1,2,3}. \quad (\text{II.14})$$

Когда точка пересечения прямой и кривой (см. рис. 10) лежит на переднем фронте кривой $\frac{x-1}{x^2}$, для повышения точности нахождения корней следует пользоваться кривой с растянутым передним фронтом [183].

Следует отметить, что учет при решении уравнений (II.9) и (II.10) ряда параметров первичного и вторичного контуров, значение которых весьма мало, затрудняет расчет. Пренебрежение этими параметрами дает меньшую погрешность, чем неточный учет значений $R_{з.с}$ (в расчете предполагается его постоянство, а фактически $R_{з.с}$ в процессе сварки значительно изменяется), L_{2s} и L_{20} . Поэтому в схеме замещения [183], учитывающей намагничивающую составляющую i_m первичного тока (см. рис. 9, б), принято, что R_1 и L_{1s} равны нулю. Тогда

$$a_1 = \frac{R_2}{L_{2s}}; \quad a_2 = \frac{L_2}{k_T^2 C_p L_{2s} L_{20}}; \quad (\text{II.15})$$

$$a_3 = \frac{R_3}{k_T^2 C_p L_{2s} L_{20}};$$

$$N = \frac{k_T^2 R_2^2 C_p I_{20}}{L_{2s}^2}; \quad (\text{II.16})$$

$$T = \frac{L_2}{L_{2s}} = \frac{L_{20}}{L_{2s}} + 1,$$

где k_T — коэффициент трансформации сварочного трансформатора.

С учетом начальных условий для токов получены следующие выражения [183]:

$$i_1 = \frac{U_c(0)}{k_T^2 L_{20} L_{2s} [\omega^2 + (\gamma - \alpha)^2]} \left[(R_2 - \alpha L_2) (e^{-\alpha t} - e^{-\gamma t} \cos \omega t) + \right.$$

$$\left. + \frac{\omega^2 L_2 + (\gamma - \alpha)(\gamma L_2 - R_2)}{\omega} e^{-\gamma t} \sin \omega t \right]; \quad (\text{II.17})$$

$$i_2 = \frac{U_c(0)}{k_T^2 L_{2s} [\omega^2 + (\gamma - \alpha)^2]} \left(\alpha e^{-\alpha t} - \alpha e^{-\gamma t} \cos \omega t - \frac{\omega^2 - \alpha \gamma + \gamma^2}{\omega} e^{-\gamma t} \sin \omega t \right). \quad (\text{II.18})$$

Другие исследователи [65, 66, 82, 179], пренебрегая током намагничивания сварочного трансформатора, анализировали упрощенную схему замещения разрядной цепи конденсаторной сварочной машины, в которой переходные процессы описываются дифференциальными уравнениями второго порядка. Из этих работ следует рассмотреть результаты, полученные в работах [82, 179].

В схеме замещения [82] принято (см. рис. 9, е), что R_1 , L_{1s} , L_{10} и L_{20} равны нулю. Тогда процесс разряда конденсатора описывается уравнением

$$L \frac{di_1}{dt} + Ri_1 + \frac{1}{C_p} \int_0^t i_1 dt = 0. \quad (\text{II.19})$$

С учетом начальных условий

$$i_1 = \frac{U_c(0)}{\omega' L} e^{-bt} \sin \omega' t; \quad (\text{II.20})$$

$$u_c = \frac{U_c(0)}{\sin \varphi} e^{-bt} \sin(\omega' t + \varphi), \quad (\text{II.21})$$

где

$$b = \frac{R}{2L}; \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{1}{LC_p}}; \quad (\text{II.22})$$

$$\omega' = \sqrt{\frac{1}{LC_p} - b^2}; \quad \sin \varphi = \frac{\omega'}{\omega_0} = \omega' \sqrt{LC_p}.$$

В случае приведения всех параметров схемы замещения (см. рис. 9, з) ко вторичной цепи машины [179] при колебательном разряде

$$i_2 = \frac{U_c(0) e^{-bt}}{k_T \omega' L} \sin \omega' t, \quad (\text{II.23})$$

где $\omega' = \sqrt{\frac{1}{LC_p k_T^2} - b^2}.$

Здесь ток достигает максимального значения

$$I_{2\max} = U_c(0) \sqrt{\frac{C_p}{L}} e^{-bt_a} \quad (\text{II.24})$$

при $t = t_a = \frac{1}{\omega'} \arctg \frac{\omega'}{b}$ (рис. 11, а).

При апериодическом разряде конденсаторов ($b^2 > \frac{1}{C_p L k_T^2}$; рис. 11, б)

$$i_2 = \frac{U_c(0)}{k_T L (p_1 - p_2)} (e^{p_1 t} - e^{p_2 t}); \quad (\text{II.25})$$

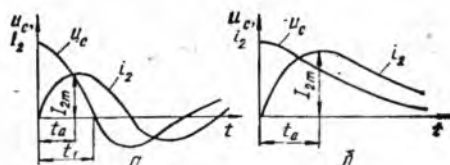


Рис. 11. Зависимость тока i_2 и напряжения u_c от времени сварки при колебательном (а) и аperiodическом (б) разрядах конденсаторов.

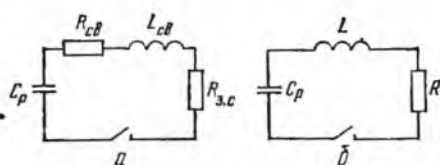


Рис. 12. Схемы разрядной цепи (а) и замещения (б) при бестрансформаторной конденсаторной сварке сопротивлением.

ток достигает своего максимального значения

$$I_{2\max} = \frac{U_c(0)}{k_T p_1 L} \left(\frac{p_2}{p_1} \right)^{\frac{p_2}{p_1 - p_2}} \quad (\text{II.26})$$

$$\text{при } t = t_a = \frac{1}{p_1 - p_2} \ln \frac{p_2}{p_1}.$$

Сравнивая приведенные выше методы расчетов токов i_1 и i_2 напряжения u_c по упрощенным схемам замещения [82, 179, 183], можно заключить, что более трудоемким является расчет, учитывающий намагничивающую составляющую первичного тока. Поскольку в большинстве случаев исходные данные для этих расчетов не могут быть точно определены, на практике широко используются методы из работ [82, 179].

При бестрансформаторной конденсаторной сварке сопротивлением схемы разрядной цепи (рис. 12, а) и замещения (рис. 12, б) имеют простой вид. Здесь принято $R = R_{с.к} + R_{в.с.}$; $L = L_{с.к.}$, где $L_{с.к.}$ — полная индуктивность сварочного контура (индуктивностью деталей, которая мала, пренебрегаем).

В зависимости от соотношения параметров L , R и C_p разряд конденсатора C_p при этом способе сварки может быть аperiodическим или колебательным.

Обычным здесь является аperiodический характер разряда, так как практически всегда индуктивность L мала (величина ее определяется только размерами сварочного контура), а емкость конденсатора C_p весьма значительна (поскольку применяются малые $U_{св.}$, исчисляемые не более чем несколькими десятками вольт). Однако при включении последовательно с конденсатором C_p дросселя и активного сопротивления (для получения определенной формы кривой сварочного тока) разряд конденсатора может быть и колебательным.

Ток при аperiodическом бестрансформаторном разряде следует рассчитывать по формулам (II.25), (II.26), исключив из них k_T .

3. Контактные и собственные сопротивления зоны сварки

Конденсаторная сварка сопротивлением — сложный термомеханический процесс, при котором нагрев сжатых между электродами металлических деталей осуществляется за счет

тепла, генерируемого током в зоне сварки на сопротивлении $R_{з.с}$ в соответствии с законом Ленца — Джоуля [49, 179]

$$Q_{з.с} = 0,24 \int_0^{t_{св}} i_{св}^2(t_{св}) r_{з.с}(t_{св}) dt_{св}, \quad (\text{II.27})$$

где $r_{з.с}$ — мгновенное значение общего сопротивления зоны сварки в интервале времени $0 - t_{св}$.

Общее сопротивление зоны сварки $R_{з.сх}$ в холодном (исходном) состоянии сжатых между электродами двух деталей перед прохождением сварочного тока можно представить в следующем виде:

$$R_{з.сх} = R_{з1д1х} + R_{д1х} + R_{длх} + R_{д2х} + R_{з2д2х}, \quad (\text{II.28})$$

где $R_{з1д1х}$ и $R_{з2д2х}$ — контактные сопротивления электрод — деталь в холодном состоянии; $R_{длх}$ — контактное (переходное) сопротивление деталь — деталь в холодном состоянии; $R_{д1х}$ и $R_{д2х}$ — собственные (металлические) сопротивления деталей в холодном состоянии.

При сжатии двух деталей между электродами (рис. 13, а) контактирующие поверхности электрод — деталь и деталь — деталь касаются в отдельных точках (рис. 13, б), так как эти поверхности никогда не являются идеально равными [201, 205]. Суммарная площадь этих точек воспринимает усилие сжатия. Токопроводящий контакт достигается на отдельных участках точек контактирования — так называемых α -пятнах [125, 225].

Контактное сопротивление одного α -пятна [51, 225]

$$R_{ках} = R_{па} + R_{са} = \frac{\rho_{п1}\delta_{п1} + \rho_{п2}\delta_{п2}}{\pi a^2} + \frac{\rho_{м1} + \rho_{м2}}{4a}, \quad (\text{II.29})$$

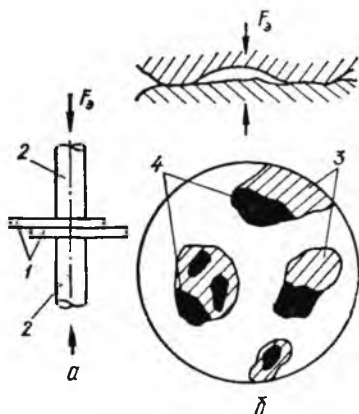


Рис. 13. Зона сварки (а) и участки контактирования в ней (б): 1 — свариваемые детали, 2 — электроды, 3 — контактные точки; 4 — α -пятна.

где a — радиус α -пятна; $R_{па}$ — сопротивление пленки α -пятна; $R_{са}$ — сопротивление стягивания α -пятна; $\rho_{п1}$, $\rho_{п2}$ —

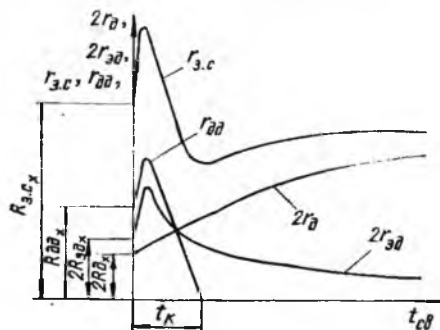


Рис. 14. Зависимость сопротивлений $r_{з.с}$, $r_{ад}$, $2r_{ад}$ и $2r_{кд}$ от времени сварки $t_{св}$ при нагреве.

удельное сопротивление пленок на поверхностях каждого из контактирующих металлов; $\delta_{п1}$, $\delta_{п2}$ — толщина пленок на каждом металле; $\rho_{м1}$, $\rho_{м2}$ — удельное сопротивление контактирующих металлов.

Сопротивление $R_{па} \gg R_{са}$ [225], так как шероховатость поверхности контактирующих металлов обычно небольшая.

Сумма проводимостей α -пятен определяет токопроводящий физический контакт в зонах электрод — деталь и деталь — деталь.

При усилиях $F_в \geq 2,0 \div 2,5$ кН и давлении в контакте $\sigma_k > 0,15 \div 0,2$ ГПа пленки на свариваемых деталях, прошедших поверхностную подготовку, разрушаются, что и обуславливает невысокие значения сопротивлений $R_{длх}$, $R_{элх}$ и $R_{а.сх}$ [228]. При усилиях $F_в < 2,0 \div 2,5$ кН и $\sigma_k < 0,15 \div 0,2$ ГПа, при которых осуществляется сварка металлов малых толщин, эти пленки не разрушаются и абсолютные значения $R_{длх}$ и $R_{элх}$ велики [33, 44]. Поэтому здесь проявляется роль туннельного сопротивления [51, 225], которое обусловлено туннельным эффектом (способностью электронов с относительно невысоким уровнем энергии проникать сквозь узкий потенциальный барьер, создаваемый тонкими пленками). Туннельное удельное сопротивление снижается с уменьшением толщины пленок δ_p и энергии выхода электронов из металла, а также с увеличением падения напряжения в зоне сварки.

Отношение туннельного сопротивления пленки к сопротивлению стягивания при $a = 50$ мкм и $\delta_p = 1 \div 3$ нм составляет $(0,5 \div 1,0) \cdot 10^4$ [51, 225].

Контактные сопротивления в холодном состоянии пар металлов $R_{длх}$ и $R_{элх}$ для различных значений усилия $F_в$ можно рассчитывать по формулам

$$R_{длх} = \frac{R'_{длх}}{F_в^{\alpha_1}}; \quad R_{элх} = \frac{R'_{элх}}{F_в^{\alpha_2}}, \quad (II.30)$$

где $R'_{длх}$ и $R'_{элх}$ — контактные сопротивления контактирующих пар (при данном способе подготовки поверхности), сжатых усилием $F_в = 9,81$ Н; α_1 , α_2 — безразмерные показатели степени. В частности для сталей $\alpha_1 = 0,65 \div 0,75$, для алюминиевых сплавов $\alpha_1 = 0,75 \div 0,85$ [49, 52].

Экспериментально установлено [49, 52], что при усилии сжатия $F_в > 1,5 \div 2,5$ кН и $\sigma_k > 0,2$ ГПа стальных деталей между электродами из медных сплавов закономерна зависимость

$$R_{элх} \leq 0,5 R_{длх}. \quad (II.34)$$

Однако наш опыт показал, что при усилиях $F_в \leq 1,5 \div 2,0$ кН и $\sigma_k < 0,2$ ГПа (что характерно для сварки металлов малых толщин и сечений) это сопротивление может составлять [33]

$$R_{элх} \leq (0,3 \div 1) R_{длх}. \quad (II.32)$$

Входящее в формулу (II.27) общее сопротивление зоны сварки $r_{з.с}$ является переменной величиной, так как его составляющие

(II.28) изменяются в процессе нагрева. Поэтому $r_{в.с}$ может быть представлено как сумма мгновенных значений (в каждый данный момент) всех его составляющих:

$$r_{в.с} = r_{в1д1} + r_{д1} + r_{дд} + r_{д2} + r_{в2д2}. \quad (II.33)$$

В соответствии с последней формулой можно представить уравнение (II.27) в виде

$$Q_{в.с} = 0,24 \int_0^{t_{св}} [r_{в1д1}(t_{св}) + r_{д1}(t_{св}) + r_{дд}(t_{св}) + r_{д2}(t_{св}) + r_{в2д2}(t_{св})] dt_{св}. \quad (II.34)$$

В процессе сварки входящие в формулу (II.34) сопротивления [48, 49, 58, 74, 119] изменяются по довольно сложным законам (рис. 14). В начале прохождения импульса сварочного тока линии тока в зонах контактирования деталей с электродами и между собой стягиваются к местам с хорошей проводимостью, что вызывает повышение температуры в этих зонах и рост сопротивлений $r_{дд}$ и $r_{вд}$. Затем в результате пробоя оксидных пленок и смятия микронеровностей площади контактирования в указанных выше зонах увеличиваются, а сопротивления $r_{дд}$ и $r_{вд}$ уменьшаются. Принято считать, что после образования между свариваемыми деталями жидкой прослойки или же достижения там температуры рекристаллизации (при сварке в твердом состоянии) в контакте этих деталей сопротивление $r_{дд}$ становится равным нулю (исчезает). Время t_n , за которое $r_{дд}$ снижается до нуля, составляет 0,5—2 мс [175, 218].

Собственное сопротивление деталей с повышением температуры в зоне сварки увеличивается в связи с ростом удельного электросопротивления ρ свариваемого материала, и после того как исчезает контактное сопротивление деталь — деталь, характер дальнейшего (до конца $t_{св}$) изменения общего сопротивления зоны сварки определяется в основном изменением при нагреве собственных сопротивлений свариваемых деталей.

В этом случае величина мгновенных значений $r_{д1}$ и $r_{д2}$ зависит только от ρ .

Значение $2r_{вд}$ после исчезновения $r_{дд}$ уменьшается незначительно и определяется площадью физического контакта электрод — деталь.

Интенсивность снижения сопротивлений $r_{дд}$, $2r_{вд}$ и $r_{в.с}$ на начальной стадии процесса сварки зависит от температуры плавления, толщины оксидной пленки на металлических деталях и электродах, усилия сжатия электродов и интенсивности нагрева (времени достижения сварочным током амплитудного значения). С повышением температуры плавления оксидной пленки и усилия F_a интенсивность спада $r_{дд1}$, $2r_{вд}$ и $r_{в.с}$ уменьшается, а с увеличением $R_{длх}$, $2R_{вдх}$ и $R_{в.сх}$ (за счет утолщения оксидной пленки) и интенсивности нагрева — увеличивается.

Значение сопротивлений $R_{длх}$, $2R_{вдх}$ и $R_{в.сх}$ зависит от способа и качества предварительной обработки (механическая, химическая, термическая) деталей под сварку, длительности и условий их

хранения после такой обработки до выполнения сварки, усилия F_0 , твердости свариваемого материала, качества контактной поверхности электродов (шероховатости их поверхности, наличия оксидных пленок и других загрязнений) и пр.

Величина и диапазон рассеяния сопротивлений $R_{длх}$, $2R_{элх}$ и $R_{з.сх}$ после травления и полирования (химического и электролитического), термической обработки деталей в восстановительных средах и вакууме меньше, чем после их обезжиривания. Плохая промывка деталей от остатков на них травильных растворов, увеличение длительности химической обработки (например, пассивирования) повышают величину и диапазон рассеяния этих сопротивлений за счет утолщения слоя химических пленок на поверхности деталей. Аналогичная зависимость наблюдается при повышении твердости и снижении шероховатости поверхности свариваемого материала, что обусловлено уменьшением радиуса и площади точек соприкосновения в переходных контактах [51, 225]. Величина и диапазон рассеяния сопротивлений $2R_{элх}$ и $R_{з.сх}$ возрастают также по мере увеличения числа сваренных точек (если контактная поверхность электродов в процессе выполнения точек не зачищается).

Уравнение регрессии, устанавливающее зависимость между сопротивлениями $R_{длх}$, $R_{элх}$, $R_{з.сх}$, усилием F_0 и временем хранения τ после обработки деталей до их сварки, можно представить в виде полинома второго порядка [44]

$$M \lg R_{з.сх}(R_{длх}, R_{элх}) = b_0 + b_{F_0} F_0 + b_{\tau} \tau + b_{F_0^2} F_0^2 + b_{\tau^2} \tau^2 + b_{F_0 \tau} F_0 \tau, \quad (II.35)$$

где $M \lg R_{з.сх}(R_{длх}, R_{элх})$ — математическое ожидание $\lg R_{з.сх}(R_{длх}, R_{элх})$; b_0 , b_{F_0} , b_{τ} , $b_{F_0^2}$, b_{τ^2} , $b_{F_0 \tau}$ — коэффициенты уравнения регрессии.

С надежностью 95 % значение $\lg R_{з.сх}(R_{длх}, R_{элх})$ находится в пределах

$$\begin{aligned} M \lg R_{з.сх}(R_{длх}, R_{элх}) - 1,96\sigma \lg R_{з.сх}(R_{длх}, R_{элх}) &\leq \\ &\leq \lg R_{з.сх}(R_{длх}, R_{элх}) \leq M \lg R_{з.сх}(R_{длх}, R_{элх}) + \\ &+ 1,96\sigma \lg R_{з.сх}(R_{длх}, R_{элх}), \end{aligned} \quad (II.36)$$

где $\sigma \lg R_{з.сх}(R_{длх}, R_{элх})$ — стандартное отклонение.

Экспериментально установлено, что с увеличением усилия F_0 и уменьшением времени хранения τ [44] абсолютные значения и диапазон рассеяния сопротивлений $R_{длх}$, $2R_{элх}$ и $R_{з.сх}$ уменьшаются, что вызвано увеличением размеров и количества α -пятен. При хранении деталей после обработки в обычных атмосферных условиях эти сопротивления увеличиваются более резко из-за интенсификации адсорбции.

Важно отметить, что по мере уменьшения толщины свариваемого металла растут абсолютные значения сопротивлений $R_{длх}$, $2R_{элх}$ и $R_{з.сх}$ [33, 44, 132, 137, 143].

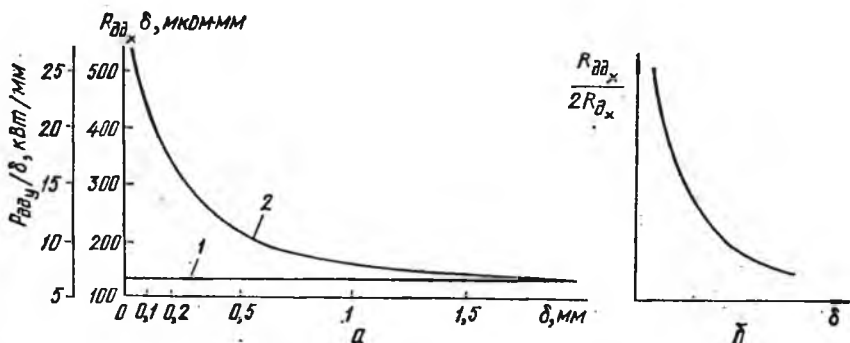


Рис. 15. Зависимость величин $R_{цл_х} \delta$, $\frac{P_{дл_у}}{\delta}$ (а) и $\frac{R_{в.с_х}}{2R_{цл_х}}$ (б) от толщины δ для малоуглеродистой стали; 1 — теоретическая ($R_{цл_х} = \frac{1}{\delta}$); 2 — расчетная ($R_{цл_х} = \frac{R_{цл_х}^*}{F_0^\alpha}$); $R_{цл_х}^* = 0,005$ Ом; $\alpha = 0,7$; для $\delta = 2 + 2$ мм, $F_0 = 5$ кН.

Экспериментальные исследования и расчеты [132] показывают, что при одинаковом состоянии поверхностей деталей из малоуглеродистой стали толщиной $\delta = 0,05 \div 2,0$ мм, прошедших поверхностную подготовку, крайние значения сопротивления $R_{цл_х}$ различаются почти в 170 раз, хотя отношение толщин деталей составляет только 40. Поэтому зависимость $R_{цл_х} \delta = f(\delta)$, которая при изменении контактного сопротивления деталь — деталь в соответствии с критериями подобия¹ должна была бы являться строго неизменной (рис. 15, а, кривая 1), фактически значительно растет в области малых толщин металла и несколько спрямляется при толщине более 1 мм (кривая 2). Поэтому с уменьшением толщины металла отношение контактных сопротивлений $R_{цл_х}$ и $2R_{в.с_х}$, а значит, и суммарного сопротивления $R_{в.с_х}$ к собственному сопротивлению $2R_{цл_х}$ (сопротивление $R_{цл_х}$ геометрически подобных столбиков металла обратно пропорционально их линейным размерам) резко возрастает (рис. 15, б).

4. Нагрев металла при точечной и рельефной сварке

Процессы выделения тепла и теплоотвода при точечной и рельефной конденсаторной сварке должны обеспечивать нагрев металла в участке сжатых между электродами деталей до температур их плавления или близких к ним. Нагрев металла при конденсаторной сварке сопротивлением характеризуется высокими скоростями (табл. 2), а температурное поле имеет резко выраженную не-

¹ Фактически все контактные сопротивления в зоне сварки теорией подобия [179] не учитываются,

Таблица 2. Средние расчетные значения скоростей нагрева

Свариваемые металлы	Температура плавления, °C	Средние скорости нагрева, $1 \cdot 10^3$ °C/c
Алюминий	660	330—110
Бронза БрОФ	995	500—170
Золото	1063	530—180
Латунь Л63	905	450—150
Медь М1	1083	540—180
Платина	1774	890—300
Серебро	961	480—160
Сталь 12Х18Н9Т	1440	720—240
Сталь Ст3	1495	750—250
Титан	1725	860—290

Примечание. При расчетах средних скоростей нагрева условно принято, что металл в зоне сварки находится при средней температуре, равной температуре его плавления, в течение всего времени разряда конденсаторов ($t_{св}$).

ки электрод — деталь, деталь и деталь — деталь.

Тепло, выделяемое на сопротивлении $R_{дл}$, по сравнению с теплом, генерируемым на $2R_{зд}$, в меньшей мере отводится в электроды, поэтому роль $R_{дл}$ как источника нагрева ядра точки заметно повышается.

Для оценки тепла $Q_{дл}$, генерируемого на сопротивлении $R_{дл}$, целесообразно ввести [132, 149] понятие его условной электрической мощности

$$P_{длy} = I_{сн}^2 R_{длx}. \quad (II.37)$$

Зависимость $P_{длy}/\delta = f(\delta)$, которая по своему характеру идентична зависимости $R_{длx}\delta = f(\delta)$, показывает (рис. 15, а), что с уменьшением толщины свариваемого материала увеличивается расчетная величина отношения $\frac{P_{длy}}{\delta}$ и, следовательно, возрастает доля тепла $Q_{дл}$ в общем балансе тепловыделения [132, 149].

Это проверено на основе экспериментальных исследований по точечной конденсаторной микросварке различных металлов, выполненных (при прочих равных условиях) сначала без зачистки поверхности деталей, а затем с их зачисткой мелкой наждачной бумагой только на площадках контактирования деталь — деталь. Результаты этих исследований [132, 149] (рис. 16, а) подтверждают, что с уменьшением толщины свариваемого металла процентное снижение прочности соединения, обусловленное уменьшением $Q_{дл}$ (за счет снижения $R_{длx}$), возрастает. Здесь за $F_0 = 100$ % принята прочность точек при сварке металлов без зачистки.

Качественное влияние тепла $Q_{дл}$ на прочность сварных точек при конденсаторной микросварке может быть оценено значением

равномерность. Здесь также характерно, что время нагрева зоны сварки $t_{наг}$ всегда значительно меньше времени ее охлаждения $t_{ох}$.

Известно, что при сварке температурное поле в значительной мере зависит от интенсивности и распределения источников тепла. С учетом рассмотренного выше характера изменения сопротивлений $2R_{зд}$, $2R_{дл}$ и $R_{дл}$ нагрев при точечной и рельефной конденсаторной сварке следует рассматривать как результат наложения температурных полей, создаваемых током, протекающим через участ-

коэффициента прочности точек

$$k_{F_p} = \frac{F_{pi}}{F_{piH}} 100 \%, \quad (\text{П.38})$$

где F_{pi} и F_{piH} — соответственно прочность сварных точек [84, 175] при разных значениях одного из параметров режима сварки (обуславливающего изменение $Q_{длх}$, в частности усилия сжатия $F_{вж}$) и прочность точек при номинальном (оптимальном) значении этого же параметра.

Так, с увеличением $F_{вж}$ или соответственно коэффициента усилий сжатия $k_{F_{вж}} = F_{вж}/F_{вжH}$ при всех прочих равных условиях прочность сварных точек и коэффициент k_{F_p} снижаются (рис. 16, б, в), причем в большей мере с уменьшением толщины металла.

Влияние тепла $Q_{дл}$ на прочность и размеры диаметрального сечения сварной точки подтверждено и другими исследованиями точечной конденсаторной сварки [132, 149]. Так, при сварке стали 08кп толщиной $0,2 + 0,2$ мм при увеличении $R_{длх}$ от 470 до 11 500 мкОм диаметральное сечение ядра точки возрастает примерно в два раза, что обуславливает повышение прочности точек (рис. 17).

Аналогичный результат был получен при точечной сварке никеля НП2 толщиной $0,1 + 0,1$ мм, когда через предварительно сварен-

ную точку пропусклся импульс сварочного тока (при строгом сохранении установочных параметров режима сварки). Оказалось, что высота и диаметр первой точки соответственно равны 0,1 и 0,35 мм, а второй — 0,035 и 0,27 мм. Уменьшение размеров диаметрального

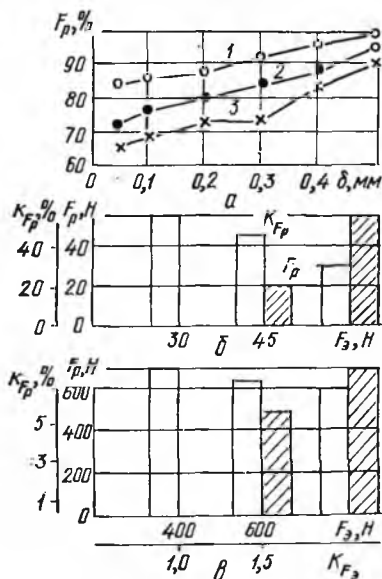


Рис. 16. Зависимость величин, характеризующих прочность точек [132]: а — F_p от толщины δ для латуни Л63 (1), стали 10 (2) и алюминия А97 (3); б, в — k_{F_p} от усилия $F_{вж}$ и $k_{F_{вж}}$ для бронзы БрБ2,5 толщиной $0,1 + 0,1$ мм (б) и $0,35 + 0,35$ мм (в).

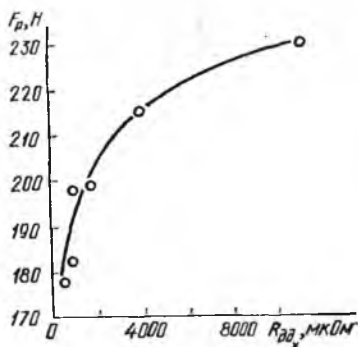


Рис. 17. Зависимость разрывного усилия F_p от контактного сопротивления $R_{длх}$.

сечения второй точки обусловлено главным образом тем, что контактное сопротивление $R_{\text{длх}} = 0$ (следовательно, отсутствует выделение тепла $Q_{\text{дл}}$) и в меньшей мере увеличением теплоотода в электроды.

При точечной конденсаторной сварке сталей толщиной $\delta + \delta$ на оптимальном режиме и нагреве на этом же режиме одной детали из этого же металла двойной толщины 2δ площади диаметрального сечения сварных точек в первом случае превышают аналогичные площади в одинарной пластине. Однако при сварке этих образцов на заведомо мягком режиме (когда интенсивность нагрева меньше) роль теплоотода существенно возрастает и формирование теплового поля изменяется настолько, что различие в размерах ядер сварных точек $\delta + \delta$ и 2δ практически не наблюдается¹.

Экспериментально также установлено, что при точечной и рельефной конденсаторной сварке с уменьшением времени t_a достижения сварочным током амплитудного значения при всех прочих равных условиях растет объем ядра сварной точки.

Таким образом, с увеличением интенсивности нагрева как путем увеличения $R_{\text{длх}}$ и уменьшения t_a , так и путем изменения обоих этих параметров роль тепла $Q_{\text{дл}}$, генерируемого на контактом сопротивлении $R_{\text{дл}}$, в общем тепловом балансе зоны точечной микросварки существенно возрастает.

При точечной и рельефной конденсаторной сварке металлов наиболее значительная часть тепла, выделяющегося на участках контактирования электродов — деталь $Q_{\text{в1д1}}$ и $Q_{\text{в2д2}}$, отводится в электроды (из меди и ее сплавов). Поэтому по сравнению с $Q_{\text{дл}}$ роль $Q_{\text{в1д1}}$ и $Q_{\text{в2д2}}$ как теплоносителей существенно понижается. Вместе с тем следует отметить, что в определенных условиях (при плохой подготовке поверхности деталей, загрязнении и окислении поверхности электродов, заниженных усилиях F_a и рабочей площади электродов и др.) выделение значительных количеств тепла $Q_{\text{в1д1}}$ и $Q_{\text{в2д2}}$ может вызвать недопустимые дефекты сварных соединений (наружный выплеск, чрезмерные вмятины от электродов, следы меди на поверхности деталей и др.).

На основе анализа приведенных выше данных о влиянии большого числа факторов на характер изменения в процессе сварки сопротивлений $R_{\text{дл}}$, $R_{\text{эд}}$ и $R_{\text{л}}$ (прежде всего $R_{\text{дл}}$), а также роли количества тепла $Q_{\text{дл}}$, $Q_{\text{в1д1}}$ и $Q_{\text{в2д2}}$ в общем балансе тепловыделения зоны сварки можно сделать вывод, что теоретический расчет общего тепла $Q_{\text{а.с}}$ представляет значительные трудности.

При конденсаторной сварке сопротивлением тепло $Q_{\text{с.т}}$, необходимое для образования сварной точки, можно представить в виде

$$Q_{\text{с.т}} = Q_{\text{ц.с}} + Q_{\text{втл}} + Q_{\text{в}} + Q_{\text{ли}}, \quad (\text{II.39})$$

¹ В связи с этим приведенные в работах [2, 175] данные о незначительной роли тепла $Q_{\text{дл}}$ в общем балансе тепловыделения $Q_{\text{а.с}}$ справедливы только для случая сварки металлов на мягких режимах, когда существенно растет теплоотвод в электроды и зону термического влияния.

где $Q_{ц.с}$ — тепло, необходимое для нагрева условно выделенного центрального столбика металла высотой 2δ и диаметром $d_в$, зажато между электродами; $Q_{эТВ}$ — тепло для нагрева металла, окружающего центральный столбик (область зоны термического влияния); $Q_э$ — потери тепла в оба электрода ($Q_{э1} + Q_{э2}$); $Q_{ли}$ — потери тепла на лучеиспускание с поверхности свариваемых деталей.

При точечной и рельефной конденсаторной сварке потерями тепла на лучеиспускание можно вполне пренебрегать, так как в этом случае время сварки очень мало [137, 142] и эти потери весьма незначительны. Тогда расчетное тепло

$$Q_{с.т} = Q_{ц.с} + Q_{эТВ} + Q_э. \quad (II.40)$$

Тепловые процессы при точечной и рельефной конденсаторной микросварке изучены недостаточно, что объясняется определенными техническими трудностями. Так, измерение температуры в зоне микросварки с помощью термопары затруднено главным образом вследствие соизмеримости размеров ее спая и сварной точки. Кроме того, введение спая термопары в зону образования микросварного соединения искажает физическую картину тепловых процессов. Этот недостаток и ряд других (неравномерный разогрев, невозможность тарирования усиленного сигнала) ограничивают применение для измерения температуры в зоне сварки и термосопротивлений. Фотоэлектрический способ измерения температуры [217] ввиду заложенных в него грубых допущений также не позволяет получить достоверные результаты. Поэтому составляющие $Q_{ц.с}$, $Q_{эТВ}$ и $Q_э$ тепла $Q_{с.т}$ могут быть рассчитаны на основе условного распределения температуры [49, 52] в зоне сварки (рис. 18, б, в).

В случае сварки двух пластин из однородного металла толщиной δ формула (II.40) может быть представлена в таком виде:

$$Q_{с.т} = \underbrace{\frac{\pi d_э^2}{4} 2\delta c_{с.м} \gamma_{с.м} T_{пл}}_{Q_{ц.с}} + \underbrace{\pi x_{эТВ} (d_э + x_{эТВ}) 2\delta c_{с.м} \gamma_{с.м} \frac{T_{пл}}{4}}_{Q_{эТВ}} + \underbrace{2 \frac{\pi d_э^2}{4} x_э c_э \gamma_э \frac{T_{пл}}{8}}_{Q_э}. \quad (II.41)$$

Здесь $d_э$ — диаметр контактной поверхности рабочей части электрода; $\gamma_{с.м}$, $c_{с.м}$ — соответственно плотность и средняя теплоемкость при нагреве свариваемого материала до температуры его плавления; $x_{эТВ}$ — ширина зоны термического влияния вокруг центрального столбика (высотой 2δ и диаметром $d_э$), нагретого до температуры $\frac{T_{пл}}{4}$ (в расчетах можно принимать, что: $x_{эТВ} = 4 \sqrt{a_{с.м} t_{св}}$; $a_{с.м} = \frac{\lambda_{с.м}}{c_{с.м} \gamma_{с.м}}$, где $a_{с.м}$, $\lambda_{с.м}$ — соответственно температуропроводность

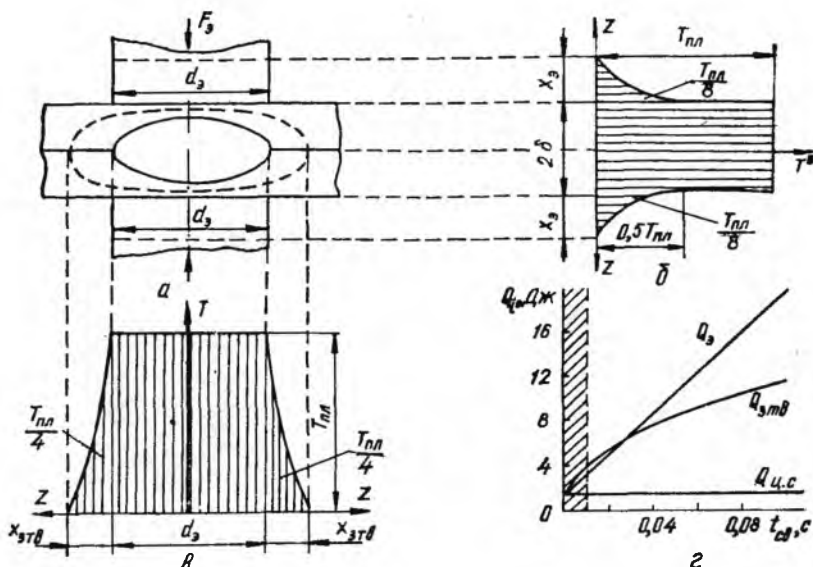


Рис. 18. Некоторые характеристики тепловых процессов при точечной контактной микросварке стали 08кп $\delta = 0,1 + 0,1$ мм и $t_{св} = 0,03 - 0,10$ с:

a — схема сварки; *b, в* — расчетные температуры соответственно в направлении оси электродов и перпендикулярно к ним; *г* — зависимости количества тепла $Q_{ц.с.}$, $Q_{з.тв}$ и Q_z от времени $t_{св}$.

и теплопроводность свариваемого металла; x_a — длина рабочей части электрода, нагреваемой до средней температуры, приблизительно равной $T_{пл}/8$; $x_a \approx 4 \sqrt{a_m t_{св}}$, a_m — температуропроводность электродного материала); γ_z , c_a — соответственно плотность и средняя теплоемкость материала рабочей части электрода при нагреве до $T_{пл}/8$.

Средние теплоемкости $c_{с.м}$ и c_m определяются по формуле $\frac{c_k + c_{пл}}{2}$, где c_k , $c_{пл}$ — соответственно теплоемкости при температуре комнатной и плавления данных материалов.

При точечной сварке двух разнородных металлов одинаковой толщины формула (II.40) преобразуется к виду

$$Q_{с.т} = \frac{\pi d_a^2}{4} \delta (c_1 \gamma_1 T_{пл1} + c_2 \gamma_2 T_{пл2}) + \left\{ \pi x'_{з.тв} (d_a + x'_{з.тв}) \delta c_1 \gamma_1 \frac{T_{пл1}}{4} + \right. \\ \left. + \pi x''_{з.тв} (d_a + x''_{з.тв}) \delta c_2 \gamma_2 \frac{T_{пл2}}{4} \right\} + 2 \frac{\pi d_a^2}{4} x_z c_a \gamma_z \frac{(T_{пл1} + T_{пл2})}{16}, \quad (II.42)$$

где γ_1 , γ_2 — плотности свариваемых разнородных металлов; c_1 и c_2 — средние теплоемкости этих металлов; $T_{пл1}$ и $T_{пл2}$ — температуры плавления этих металлов; $x'_{з.тв}$ и $x''_{з.тв}$ — ширина зоны термического влияния, окружающая ядро сварной точки в разнородных материалах.

Как видно из формул (II.41), (II.42), количество тепла $Q_{ц.с.}$ определяется размерами центрального столбика и теплофизическими свойствами свариваемого металла и не зависит от продолжительности нагрева. Однако значения $Q_{э.тв}$ и $Q_э$ увеличиваются с возрастанием времени сварки. В частности, при точечной конденсаторной сварке малоуглеродистой стали 10 толщиной 0,1 + 0,1 мм (рис. 18, з) на режимах $t_{св} < 0,01$ с потери тепла $Q_{э.тв}$ и $Q_э$ по абсолютной величине соизмеримы с $Q_{ц.с.}$. Когда же эта сталь сваривается при $t_{св} > 0,01$ с (более мягкий режим), потери тепла $Q_э$ больше $Q_{ц.с.}$ в 18,5 раза, а $Q_{э.тв}$ больше $Q_{ц.с.}$ в 10 раз. Таким образом, на рис. 18, з зависимости $Q_{э.тв} = f(t_{св})$ и $Q_э = f(t_{св})$ показывают, что использование очень малых длительностей $t_{св}$ позволяет резко снизить потери тепла $Q_{э.тв}$ и $Q_э$ (заштрихованная область на рис. 18, з).

Важнейшим энергетическим параметром, характеризующим процесс контактной сварки, является равенство тепла, выделенного в зоне сварки $Q_{з.с.}$ теплу, необходимому для образования сварной точки $Q_{с.т}$ [8]. Поэтому, рассчитав тепло $Q_{с.т}$ и выбрав технологически необходимое время $t_{св}$ (выбор рассмотрен в гл. V), определяем по закону Ленца—Джоуля действующее значение сварочного тока

$$I_d = \sqrt{\frac{Q_{с.т}}{0,24k_R r_{з.с.к} t_{св}}}, \quad (\text{II.43})$$

где I_d — условная величина постоянного тока, вызывающего такое же тепловое действие, что и импульс сварочного тока $i_{св}$ при разряде рабочих конденсаторов, причем амплитудное значение тока $I_{св \max}$ вычисляется по формуле¹

$$I_{св \max} = \sqrt{2} I_d; \quad (\text{II.44})$$

k_R — коэффициент, учитывающий изменение сопротивления $r_{з.с.}$ в процессе сварки и равный для алюминиевых, медных и магниевых сплавов 1,2—1,4; для коррозионных сталей и титана 1,1—1,2; для низкоуглеродистых и низколегированных сталей 1,0—1,1 [49, 52].

Сопротивление $r_{з.с.к}$ (сопротивление зоны сварки к концу нагрева [49, 175]) определяется на основе условного распределения температуры (см. рис. 18, а—е) по формуле [175]:

$$r_{з.с.к} = \frac{k_{р.т} 2\delta \rho_m}{\pi d_a^2}, \quad (\text{II.45})$$

где $k_{р.т}$ — коэффициент, учитывающий растекание сварочного тока за пределы центрального столбика металла, ограниченного поверхностью цилиндра диаметром, равным d_a электрода (рис. 19, а); зависимость $k_{р.т}$ от отношения d_a/δ приведена на рис. 19, б; ρ_m — удель-

¹ Значение $I_{св \max}$ в зависимости от I_d имеет место только при синусоидальной форме, а при конденсаторной сварке величиной $\sqrt{2}$ можно пользоваться только для приближенных расчетов (поскольку разрядный ток конденсаторов несинусоидален).

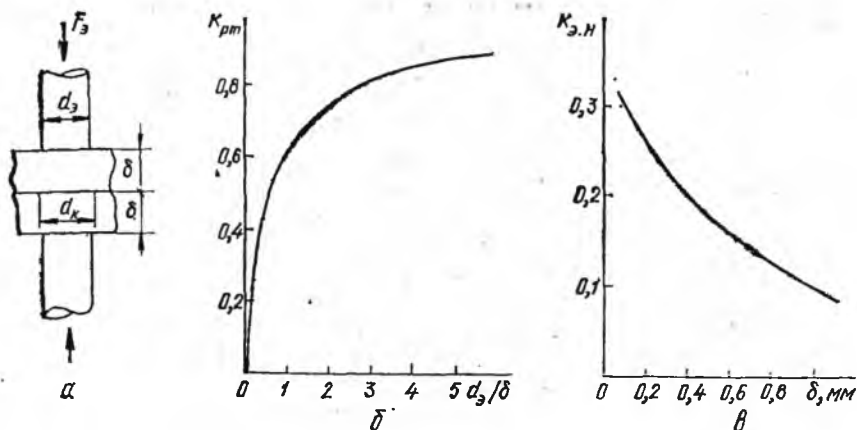


Рис. 19. Зависимость в зоне d_k (а) коэффициентов растекания тока k_{pt} от соотношения $\frac{d_0}{\delta}$ (б) и эффективности нагрева $k_{э.н}$ от толщины δ (в),

ное сопротивление свариваемого материала при $T_{пл}$; d_k — диаметр контакта между свариваемыми деталями, который увеличивается с повышением усилия F_s и толщины δ свариваемых деталей до некоторого предельного значения [49, 52]

$$d_{kp} \approx d_0 + 1,7\delta. \quad (\text{II.46})$$

При конденсаторной сварке металлов толщиной более 0,7—0,8 мм при оптимальных и повышенных усилиях F_s

$$d_k = d_0 + (1,4 \div 1,7) \delta, \quad (\text{II.47})$$

а при относительно малых F_s

$$d_k = d_0 + (1,0 \div 1,3) \delta. \quad (\text{II.48})$$

При конденсаторной сварке металлов малых толщин (менее 0,7 мм)

$$d_k = d_0; \quad d_{kp} \approx d_0. \quad (\text{II.49})$$

Поэтому формулу (II.45) можно записать в виде

$$r_{э.с.к} = \frac{k_{р.т} 2\delta \rho_{\mu}}{\pi d_0^2}. \quad (\text{II.50})$$

Выше было показано, что при точечной и рельефной конденсаторной сварке металлов толщиной $\delta < 0,5 \div 0,7$ мм (особенно $\delta < 0,3$ мм) доля тепла $Q_{пл}$ в общем тепловом балансе довольно существенна. Для таких случаев рационально ввести коэффициент эффективности нагрева зоны сварки $k_{э.н}$, который показывает долю тепла $Q_{пл}$ в общем тепле $Q_{э.с}$:

$$k_{э.н} = Q_{пл}/Q_{э.с}. \quad (\text{II.51})$$

Приведенная на рис. 19, в экспериментальная зависимость $k_{э.н} = f(\delta)$ показывает, что с уменьшением толщины свариваемого металла значения коэффициента $k_{э.н}$ заметно возрастают. Причем если

$k_{в.н}$ равен, например, 0,3, то выделение при нагреве зоны сварки требуемого количества тепла $Q_{в.с}$ будет примерно на 30 % достигаться за счет тепла $Q_{дд}$. Поэтому при конденсаторной сварке на оптимальных режимах металлов толщиной менее $0,5 \div 0,7$ мм расчетное значение $I_{св \max}$ ((II.43) и (II.44)) необходимо уменьшить на величину, пропорциональную коэффициенту $k_{в.н}$.

5. Полярные явления

Конденсаторная сварка сопротивлением выполняется в основном нагревом зоны сварки униполярным импульсом тока. При таком характере кривой сварочного тока проявляется и имеет практическое значение полярный эффект Пельтье [12, 110, 111]¹, суть которого состоит в следующем. В металлических материалах средняя энергия электронов различна, изменение ее при нагреве этих материалов также неодинаково и зависит от количества в них примесей. Кроме того, у металлических материалов энергия электронов в твердом и расплавленном состоянии неодинакова. Эти свойства металлов лежат в основе эффекта Пельтье.

Есть пропускать электрический ток через контакт расплавленного и твердого однородного металла или через контакт двух различных металлов, то при этом наблюдаются такие явления [110]: при направлении тока через контакт, которому соответствует передвижение электронов из металла, где их средняя энергия больше, в металл, где электроны имеют меньшую энергию, происходит передача избытка этой энергии кристаллам данного металла, сопровождающаяся выделением тепла Пельтье; при изменении направления тока, вызывающем перемещение электронов из металла, где их средняя энергия меньше, в металл с более высокой энергией электронов, часть этой энергии в виде тепла Пельтье переходит в металл с большей энергией электронов, что вызывает соответствующее охлаждение другого металла.

Таким образом, в зависимости от направления тока в контакте двух металлических деталей тепло Пельтье Q_n складывается с общим теплом $Q_{з.с}$, выделяемым током по закону Ленца — Джоуля в соответствии с формулой (II.52), или же вычитается из этого тепла:

$$Q'_{з.с} = Q_{з.с} \pm Q_n, \quad (II.52)$$

где $Q'_{з.с}$ — общее тепло, выделяемое в участке между электродами сварочным током в соответствии с законом Ленца — Джоуля и эффектом Пельтье.

Важно отметить, что, как следует из формул (II.27) и (II.53), тепловое действие сварочного тока по закону Ленца — Джоуля пропорционально второй, а при эффекте Пельтье — первой степени этого тока:

$$Q_n = \pm k_n I_{св} t_{св}, \quad (II.53)$$

¹ Второе полярное явление, имеющее также место при конденсаторной сварке сопротивлением, — эффект Томсона [110] — практически незначительно влияет на процесс сварки.

Таблица 3. Значения коэффициента $k_{тэ}$

Металл	$k_{тэ}$, мкВ/°С		Металл	$k_{тэ}$, мкВ/°С	
	Железо	Медь		Железо	Медь
Алюминий	—	3,6	Медь	11,4	0
Алюмель	32,0	20,0	Молибден	6,5	4,4
Вольфрам	11,0	0,4	Никель	34,0	24,0
Иридий	12,0	1,1	Нихром	34,0	21,0
Константан	53,0	41,0	Тантал	14,5	2,6
Копель	53,0	41,0	Серебро	11,5	0,5
Магний	—	3,2	Цинк	11,0	0,1

где k_n — коэффициент Пельтье, мВ; $I_{свэ}$ — эквивалентное значение сварочного тока при разряде конденсаторов, А; $t_{св}$ — время протекания сварочного тока, с.

Значение эквивалентного тока $I_{свэ}$ определяется из уравнения [142]:

$$I_{свэ} = \sqrt{\frac{1}{t_{св}} \int_0^{t_{св}} i_{св}^2 dt_{св}}. \quad (\text{П.54})$$

Отсюда ток $I_{свэ}$ просто рассчитать по кривым сварочного (разрядного) тока $i_{св}$ путем построения из них кривых $i_{св}^2$ и последующего их графического интегрирования в соответствии с уравнением (П.54). Практически кривые тока $i_{св}$ могут быть получены с помощью осциллографирования либо путем подстановки в формулу (П.54) значений тока $i_{св}$ из уравнений, приведенных в работах [23, 52, 142] (при этом следует учитывать, что эти уравнения дают разную точность значений тока $i_{св}$, так как выведены на основании тех или иных допущений).

При конденсаторной сварке однородных металлов значения коэффициента Пельтье в мВ для границ жидкой и твердой фаз некоторых из этих металлов приведены ниже:

Al	Zn	Mg	Be	Ni	Cu	Fe	Ag
5,4	5,6	8,7	12,5	18,3	19,2	21,0	21,0

Если свариваются разнородные металлы, то для границ между ними коэффициент Пельтье рассчитывается по формуле

$$k_n = k_{тэ} T_{пл.а}, \quad (\text{П.55})$$

где $k_{тэ}$ — коэффициент термоэлектродвижущей силы, мкВ/°С; $T_{пл.а}$ — абсолютная температура на границе разнородных металлов, К.

Значения коэффициента $k_{тэ}$ для ряда соединений разнородных металлов приведены в табл. 3.

При конденсаторной сварке сопротивлением вследствие эффекта Пельтье имеет место неодинаковый нагрев каждой из свариваемых деталей, причем степень этой неравномерности зависит от величины и знака тепла Q_n . Если тепло Q_n имеет практически заметное значение, то может получиться смещение ядра сварной точки в одну из

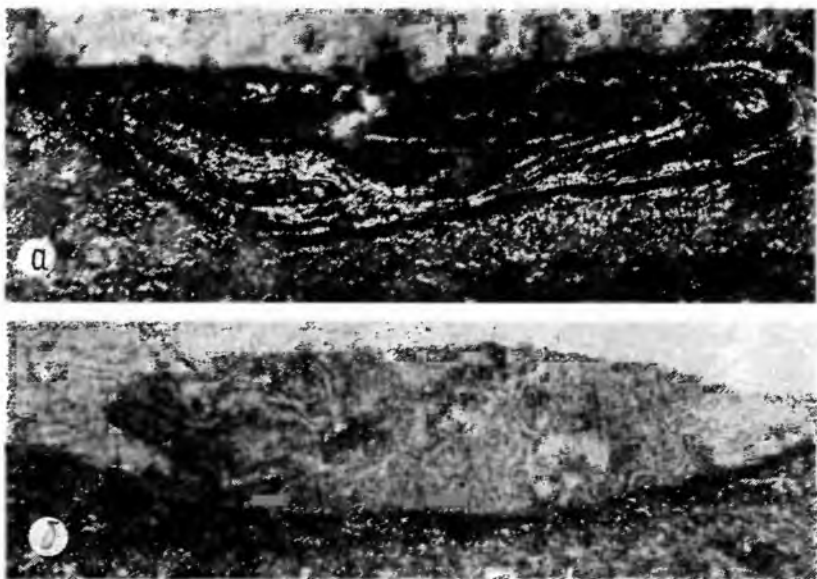


Рис. 20. Структура микросварного соединения контакта из сплава ПДСр40 диаметром 0,8 мм (сверху) с держателем из бронзы БрНБТ1,7 $\delta = 0,15$ мм, $\times 170$: а — минус на контакте; б — плюс на контакте.

деталей. При сварке деталей из различных металлов и сплавов [110] наблюдается значительное смещение ядра в сторону той детали, к которой примыкает электрод, являющийся положительным полюсом при прохождении сварочного тока. При этом за счет дополнительного подогрева детали, примыкающей к положительному электроду, создаются условия для проплавления ее на большую глубину. В другой детали вследствие охлаждения за счет эффекта Пельтье имеет место меньшее ее проплавление.

В зависимости от свойств свариваемых металлов и сплавов смещение ядра сварной точки при конденсаторной сварке этих материалов наблюдается главным образом в их разнородных сочетаниях [166, 226].

В связи с этим во многих случаях точечной конденсаторной сварки разнородных металлов, а также металлов неравных толщин может быть полезным использование эффекта Пельтье для получения желательного проплавления одной из деталей (в частности, детали, имеющей более высокую температуру плавления) или для равномерного проплавления обеих деталей (при сварке металлов неравных толщин). Например, при рельефно-точечной микросварке контактов с держателями и отрицательной полярности электрода со стороны контакта наблюдается смещение ядра сварной точки в держатель (рис. 20, а). При изменении полярности здесь происходит перераспределение тепловыделения и обеспечивается практически симметричное расположение литого ядра (рис. 20, б) [166].

ГЛАВА III

СТАБИЛЬНОСТЬ ТОЧЕЧНОЙ И РЕЛЬЕФНОЙ КОНДЕНСАТОРНОЙ СВАРКИ

1. Основные условия стабильности

В монографиях [137, 142] показано, что гарантирование строгого постоянства энергии W_k , накапливаемой в конденсаторной батарее сварочной машины, является хотя весьма важным, но далеко не единственным условием, обеспечивающим стабильность качества получаемых сварных соединений.

В работах [7, 9, 20, 21, 49] отмечалось, что при контактной сварке сопротивлением, к которой относятся точечная и рельефная конденсаторная сварка, высокая стабильность качества обеспечивается в случае вполне определенного соотношения полного сопротивления сварочного контура Z_k и общего сопротивления зоны сварки $R_{a.c.}$, поэтому нарушение указанного соотношения, связанное в первую очередь с изменением составляющих $R_{a.c.}$, обуславливает дестабилизацию сварочного процесса.

Важнейший вопрос о влиянии на стабильность процесса контактной сварки сопротивлением состояния и способов подготовки поверхностей свариваемых деталей рассмотрен в работах [3, 12, 49—52, 92, 98, 130—132, 137, 142, 199, 228]. При этом практически общепризнано, что на стабильность контактной сварки различных металлов влияет степень постоянства (в определенных, но часто довольно узких пределах) контактного сопротивления между свариваемыми деталями $R_{д.д.}$. Практически только в работе [217] утверждается, что стабилизация сопротивления деталь — деталь перед сваркой якобы не оправдывает надежд технологов, что, безусловно, ошибочно.

Экспериментально установлено значительное снижение прочности точечных микросварных соединений из цветных и черных металлов при зачистке деталей как в контакте между ними, так и со стороны примыкания электродов [131]. Все это при прочих равных условиях должно быть связано с действием на процесс образования сварного соединения тепла, выделяемого на всех переходных контактных сопротивлениях, поэтому постоянство их значений при выполнении контактной сварки сопротивлением чаще всего должно являться одним из важных условий ее стабильности.

Важные данные, связанные со стабильностью контактной сварки сопротивлением, содержатся в работе [50], в которой изучено влияние на собственное сопротивление свариваемых деталей в их холод-

ном состоянии $R_{\text{дх}}$ изменений усилия сжатия $F_{\text{с}}$, диаметра контактной поверхности электродов $d_{\text{с}}$ и толщины свариваемых деталей δ . Эти опыты показали, что значение $R_{\text{дх}}$ зависит от всех указанных выше величин, причем оно уменьшается с ростом $F_{\text{с}}$ и $d_{\text{с}}$, но увеличивается по мере возрастания δ . Это объясняется на основе известных положений теории «ситового» контакта [125, 225] и показывает, что при $\delta = \text{const}$ постоянство $R_{\text{дх}}$ может быть обеспечено только при неизменных значениях $F_{\text{с}}$ и $d_{\text{с}}$.

Безусловно также, что стабильность контактной сварки сопротивлением должна быть связана и с постоянством значений контактных сопротивлений деталь — деталь ($R_{\text{дх}}$) и электрод — деталь ($R_{\text{э1дх}}$ и $R_{\text{э2дх}}$), что в первую очередь должно обеспечиваться надежной работой механизмов сжатия сварочных машин ($F_{\text{с}} = \text{const}$) и технологией, гарантирующей необходимое состояние поверхностей деталей (в местах их сварки) и рабочих частей электродов.

Правильный подбор формы рабочих частей и материала электродов в соответствии с маркой свариваемого металла [137, 216] в значительной мере определяет износ рабочих частей электродов и, как следствие этого, оказывает заметное влияние как на формирование сварного соединения, так и на условия стабильности процесса его образования.

Существенное влияние на стабильность контактной сварки сопротивлением может оказывать состояние сварочных контуров, причем в первую очередь это имеет решающее значение во многих распространенных на практике случаях, когда в электрических узлах оборудования нет автоматических устройств для поддержания стабильного сварочного тока или энергии, расходуемой на сварку, при изменении сопротивления этих контуров. Поэтому повышение надежности сварочных контуров [203], разработка и применение приборов автоматического контроля сопротивления сварочных контуров [174], а также своевременный и тщательный уход за их элементами весьма важны для повышения стабильности сварки.

При контактной сварке сопротивлением в ряде случаев может оказаться целесообразным предварительный подогрев деталей [49, 52, 83, 98, 143] и в первую очередь этот технологический прием необходим как одна из мер, предупреждающих образование выплесков [83]. Наконец, во всех случаях должны обеспечиваться практически неизменные условия охлаждения зоны контактной сварки сопротивлением.

На основании изложенного можно сделать вывод, что в целом стабильность контактной сварки сопротивлением может быть обеспечена только при комплексном учете и сохранении практической неизменности ряда параметров режима сварки и условий ее выполнения, что более подробно будет рассмотрено ниже¹, в первую очередь

¹ Здесь и далее вопросы стабильности контактной (а значит, и конденсаторной) сварки сопротивлением рассматриваются при отсутствии в оборудовании устройств автоматического регулирования процессом сварки [19, 24, 25, 168, 177, 178, 180—182].

Таблица 4. Нарушение теплового баланса при сварке металлов толщиной $\delta \geq 0,8$ мм [8]

Причина нарушения	$Q_{с.т}$	$Q_{з.с}^*$
Увеличение δ	Увеличивается	Увеличивается
Уменьшение δ	Уменьшается	Уменьшается
Увеличение d_0	Увеличивается	»
Шунтирующие контакты	»	»
Падение напряжения сети	Не изменяется	»
Увеличение сопротивления сварочного контура	»	»

* Для машин с сопротивлением $Z_K > R_{э.с}$ [49].

применительно к точечной и рельефной конденсаторной микросварке сопротивлением.

Опыт показывает, что при контактной сварке сопротивлением получение стабильных по прочностным и другим характеристикам соединений должно обеспечиваться благодаря жесткому выполнению при каждой сварочной операции следующих главных условий: нагрев деталей в зоне сварки током $i_{св}$ в течение времени $t_{св}$ до заданного по технологии температурного состояния (характеризующегося, как правило, средней сварочной температурой $T_{св}$) вполне определенного объема металла $V_{с.м}$; обеспечение после отключения сварочного тока строго одинаковых условий охлаждения нагретого объема металла.

Безусловно, практически легче всего гарантировать выполнение второго условия, поскольку для этого достаточно определить и выдерживать оптимальное время охлаждения $t_{ох}$ свариваемых деталей, сжатых между электродами контактной машины и, кроме того, сохранять неизменными некоторые другие условия охлаждения (хорошее состояние рабочих частей электродов, их температуру и необходимую площадь контактирования со свариваемыми деталями). Значительно труднее выполнить первое условие стабильности контактной сварки сопротивлением, так как это связано с необходимостью соблюдения целого ряда параметров режима сварки и условий ее выполнения на конкретной сварочной машине.

Теоретическое и экспериментальное изучение процесса образования точки при контактной сварке сопротивлением металлов толщиной 0,8—3 мм показало [8], что важнейшим энергетическим условием его стабильности является довольно простое по виду, но имеющее глубокий физический смысл равенство теплового баланса

$$Q_{з.с} = Q_{с.т} \quad (III.1)$$

В случае нарушения теплового режима возможны непровар ($Q_{з.с} < Q_{с.т}$) и перегрев или прожог ($Q_{з.с} > Q_{с.т}$) сварных точек.

Анализируя тепловой баланс процесса образования сварной точки и причины его нарушения [8], можно сделать вывод, что основными факторами, которые могут обусловить изменение тепла $Q_{з.с}$, явля

ются изменения толщины свариваемых деталей, эффективной площади электродного контакта, напряжения на входных клеммах сварочного трансформатора, сопротивления сварочного контура и наличие пунтирующих контактов (табл. 4). Наиболее существенными и относительно малостабильными в производственных условиях факторами являются толщина δ и эффективный размер площадок электрод — деталь.

Данные табл. 4 и приведенные выше положения относятся не только к точечной конденсаторной сварке металлов толщиной 0,8—3 мм, но во многом и к рельефной конденсаторной сварке металлов таких же толщин.

Однако точечная и рельефная конденсаторная контактная микросварка имеют определенные особенности, несколько отличающие их от сварки металлов толщиной 0,8—3 мм.

2. Факторы, влияющие на изменения тепла, необходимого для образования точки при микросварке

Изменение толщины (сечения) свариваемых деталей. Исследованиями и обширным опытом производственного применения конденсаторной сварки металлов малых толщин и сечений [137, 142] установлено, что допустимые по ГОСТу отклонения толщины (сечения) от номинальных значений практически не оказывают столь заметного влияния на количество тепла $Q_{с.т.}$, чтобы с ними надо было считаться и учитывать их. Это связано с существенной ролью тепла, выделяемого на контактом сопротивлении деталь — деталь (см. гл. II).

Влияние изменения толщины и диаметра свариваемых деталей на $\pm 10\%$ номинального ее значения на прочность точек при конденсаторной микросварке [130, 132] исследовалось экспериментально. Образцы (по 10—20 шт. на каждую марку и толщину металла) вырезались из листов заданной толщины, имевших практически одинаковое хорошее состояние поверхностей. После подготовки поверхности химическими способами они поступали на сварку, которая выполнялась при стабилизированном значении напряжения зарядки конденсаторов, а также при практически неизменном усилии сжатия F_s и постоянной величине d_s (благодаря применению электродов с цилиндрическими рабочими концами). После сварки образцы подвергались механическим испытаниям на срез и металлографическим исследованиям.

Построенные на основании механических испытаний сварных соединений гисто-

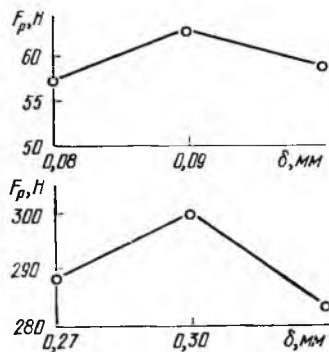


Рис. 21. Зависимость разрывного усилия F_p от изменения толщины для бронзы БрБ2,5.

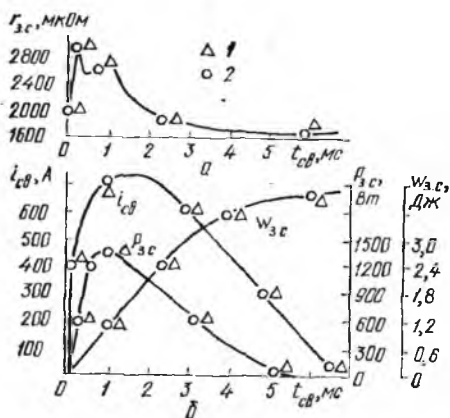
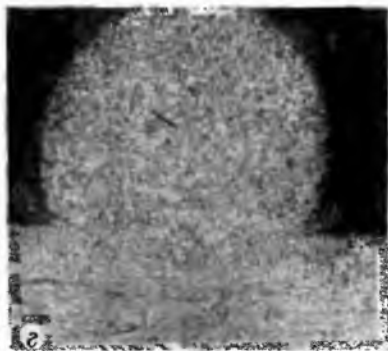
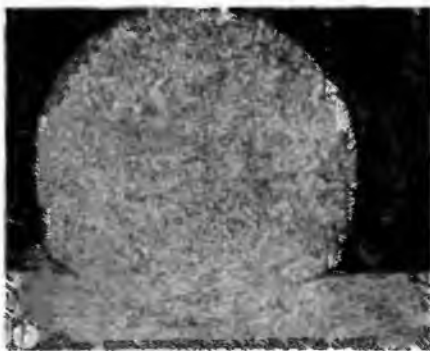


Рис. 22. Зависимости электрических параметров сварки от времени $t_{св}$ при рельефно-точечной конденсаторной микросварке проволок из никеля НП2 диаметром $d = 0,59 \pm 0,59$ мм (1) и $d = 0,54 \pm 0,54$ мм (2) и структуры соединений ($\times 100$):

а — сопротивление $r_{з.с.}$; б — ток $i_{св.}$; мощность $p_{з.с.}$, энергия $w_{з.с.}$; в — соединение 1; г — соединение 2.



граммы $F_p = f(\delta)$ приведены на рис. 21. Здесь видно, что при изменениях толщины деталей на величину около $\pm 10\%$ прочность точек во всех случаях получается наибольшей при номинальной толщине металла $\delta_{ср}$ (для которой в опытах и подбирался оптимальный режим сварки). Увеличение или уменьшение толщины металла на 10% обуславливает незначительное изменение прочности точек, что согласуется с данными металлографических исследований (во всех случаях диаметр сварных точек почти одинаковый).

Подтверждением того, что при точечной и рельефной конденсаторной сварке тонких металлов регламентированные ГОСТом отклонения от δ или d (диаметр проволок) практически допустимы, являются также опыты, которые описываются ниже [32].

При сварке проволоки, например, из никеля НП2 диаметром $0,59 \pm 0,59$ мм и $0,54 \pm 0,54$ мм (отклонение d составляет -8%) вольт-амперные характеристики зоны сварки, кривые сварочного тока $i_{св.}$, сопротивления $r_{з.с.}$, мощности $p_{з.с.}$ и энергии $w_{з.с.}$ почти не отличаются друг от друга (рис. 22, а, б). Это согласуется с данными металлографических исследований (рис. 22, в, г). Однако коэффициенты надежности (табл. 5) для соединения из проволок диаметром $0,59 \pm 0,59$ мм несколько ниже, чем для соединения $0,54 \pm$

Таблица 5. Значения коэффициентов надежности микросварных соединений из никеля НП2 при отклонении размеров деталей

Образцы	Толщина (диаметр), мм	$\bar{F}_{po}, \bar{F}_p$	S, H	$\bar{Y}$	$Y_Y (=)$	$Y_Y (\mp)$
Из основного металла	$d = 0,59$	147,19	5,89	—	—	—
	$d = 0,54$	123,42	4,94	—	—	—
Рельефно-точечные	$d = 0,59 + 0,59$	94,33	6,22	0,640	0,604	0,515
	$d = 0,54 + 0,54$	95,14	5,86	0,770	0,734	0,625
Из основного металла	$\delta = 0,1$	46,33	1,82	—	—	—
	$\delta = 0,085$	39,38	1,55	—	—	—
Точечные	$\delta = 0,1 + 0,1$	42,71	2,50	0,921	0,883	0,754
	$\delta = 0,085 + 0,085$	39,28	2,40	0,997	0,950	0,811

Примечание. Режим рельефно-точечной конденсаторной микросварки проволоки $d = 0,59 + 0,59$ мм был выбран с учетом обеспечения минимальной деформации проволок в зоне соединения, что обусловило невысокие коэффициенты надежности этих соединений.

+ 0,54 мм, что связано с более высокой прочностью основного металла F_{po} .

Надежность указанных выше микросварных соединений оценивалась по методике, приведенной в работе [31], где средний коэффициент надежности соединения определяется отношением оценок математических ожиданий — средних значений прочности микросварного соединения $\bar{F}_p$ и прочности основного металла $\bar{F}_{po}$:

$$\bar{Y} = \bar{F}_p / \bar{F}_{po}. \quad (\text{III.2})$$

С учетом рассеивания F_p и F_{po} около своих средних значений формула (III.2) принимает вид

$$Y_Y (=) = \frac{\bar{F}_p - z_Y s_{F_p}}{\bar{F}_{po} - z_Y s_{F_{po}}} \quad (\text{III.3})$$

и

$$Y_Y (\mp) = \frac{\bar{F}_p - z_Y s_{F_p}}{\bar{F}_{po} + z_Y s_{F_{po}}}, \quad (\text{III.4})$$

где Y_Y — гамма-процентный показатель надежности микросварного соединения; z_Y — квантиль нормального распределения, соответствующий вероятности γ ; s_{F_p} и $s_{F_{po}}$ — среднеквадратичные отклонения величин F_p и F_{po} .

Показатель надежности $Y_Y (=)$ отличается от показателя $Y_Y (\mp)$ тем, что в последнем в знаменателе дроби имеется плюс. Это увеличивает чувствительность показателя к разбросу $z_Y s_{F_{po}}$, который при плюсе берется по верхнему пределу.

При сварке листовых материалов, например никеля НП2 толщиной $0,1 + 0,1$ мм и $0,085 + 0,085$ мм (отклонение по δ составляет —15 %), мгновенные значения $r_{з.с}$, $p_{з.с}$ и $w_{з.с}$ несколько меньше при сварке более тонких деталей. Металлографические исследования этих соединений выявили незначительное уменьшение объема рас-

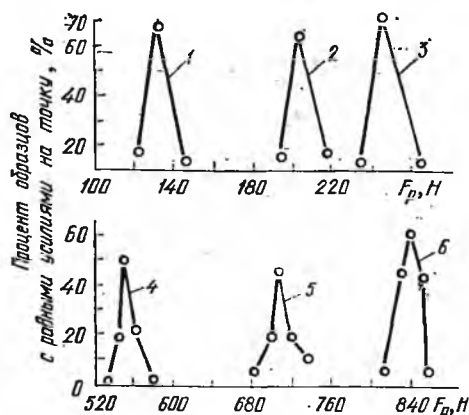


Рис. 23. Частотные кривые для точечной конденсаторной сварки:

1 — бронза БрОФ6,5-0,4, $\delta = 0,1 + 0,1$ мм; 2 — сталь 10, $\delta = 0,1 + 0,1$ мм; 3 — латунь Л163; $\delta = 0,2 + 0,2$ мм; 4 — латунь Л163, $\delta = 0,4 + 0,4$ мм; 5 — сталь 10, $\delta = 0,4 + 0,4$ мм; 6 — сталь 10, $\delta = 0,5 + 0,5$ мм.

ной $0,1 + 0,1$ мм (рис. 23, кривая 1) образцы с разрывными усилиями на точку, близкими к 125 Н, составляют 18 %, к 135 Н — 68 % и к 145 Н — 14 %. Таким образом, из всей партии образцов большинство имеет прочность, близкую к среднему значению разрывного усилия на точку, равную 136 Н. Отклонения прочности от указанной величины составляют: для образца с максимальным разрывным усилием на точку (150 Н) + 10,3 %, с минимальным (121 Н) — 11 %.

При сварке стали 10 толщиной $0,1 + 0,1$ мм (кривая 2) образцы, имеющие разрывные усилия на точку, близкие к 195 Н, составляют 16 %; к 205 Н — 66 % и к 215 Н — 18 %. Таким образом, основная часть сварных образцов имеет прочность, практически равную среднему разрывному усилию на точку (207 Н). При этом отклонения по прочности от указанной величины образцов с минимальным и максимальным разрывными усилиями составляют $\pm 6,3$ %, что свидетельствует о высокой стабильности точечной конденсаторной сварки. Аналогичные результаты получены при сварке других материалов (рис. 23, кривые 3—6).

Эффективный размер площадок электрод — деталь и деталь — деталь. При точечной и целом ряде случаев рельефной конденсаторной микросварке на стабильность значения тепла $Q_{с.т}$ также весьма существенную роль играет постоянство эффективного размера площадок электрод — деталь.

Анализ уравнения (II.41) с учетом того, что входящий в него диаметр ядра сварной точки

$$d_n = k_\delta d_\delta \quad (\text{III.5})$$

(k_δ — коэффициент, устанавливающий [49, 52] взаимосвязь между d_n и d_δ), показывает, что при точечной конденсаторной микросварке

плавленного металла при сварке образцов $0,085 + 0,085$ мм, что объясняется повышенной интенсивностью теплоотвода в электроды с уменьшением толщины δ . Однако это уменьшение объема не вызвало существенных изменений прочностных характеристик и коэффициентов надежности соединения (см. табл. 5).

Данные результаты подтверждаются также прочностными испытаниями различных материалов с отклонениями по толщине и диаметру (рис. 23). Здесь в каждой партии деталей были образцы с отклонениями по толщине ± 10 %.

При точечной конденсаторной сварке оловянно-фосфористой бронзы БрОФ6,5-0,4 толщи-

стабильность необходимо го гепла $Q_{с.т.}$ должна в первую очередь обеспечиваться за счет постоянства d_0 , так как от его значения зависит основной, первый член правой части уравнения (II.41), характеризующий количество тепла, необходимое для нагрева центрального столбика металла диаметром d_1 и толщиной 2δ ; благодаря постоянству d_0 тепло для нагрева металла в зоне вокруг сварной точки (второй член указанного уравнения) и электродов (третий его член) также будет практически постоянным, что при прочих равных условиях обеспечивает стабильность $Q_{с.т.}$; возможность надежного обеспечения при точечной конденсаторной микросварке высокой стабильности значений времени $t_{св}$ также облегчает получение неизменного значения $Q_{с.т.}$, поскольку от значения $t_{св}$ во многом зависит постоянство значений $x_{э.тв}$ и $x_э$, входящих во второй и третий члены уравнения; отклонения в толщине свариваемых деталей δ (в пределах ГОСТа), входящей в первый и второй члены уравнения (II.41), практически незначительно влияют на прочностные характеристики микросварных соединений.

Важной особенностью рельефно-точечной конденсаторной микросварки сопротивлением деталей круглого сечения между собой [54] (обычно такие детали соединяются крестообразно) и с деталями из листовых материалов очень часто является практическое неизбежное смещение под действием усилия сжатия электродов одной или обеих свариваемых деталей в местах их взаимного контактирования. При этом абсолютная величина поверхностей вдавливания в первую очередь является функцией усилия сжатия $F_э$ (а значит, зависит от его стабильности) и твердости материала свариваемых деталей. Естественно, что размером указанных поверхностей на деталях определяется эффективный размер площадок деталь — деталь, а значит, и количество тепла $Q_{с.т.}$, которое необходимо для их сварки, причем чем больше

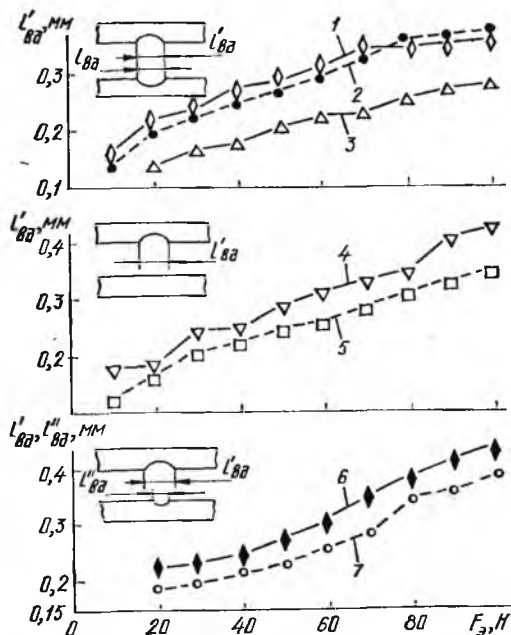


Рис. 24. Зависимость ширины вмятины $l'_{вд}$ и $l''_{вд}$ на крестообразно сложенных проволоках из никеля, платинита и молибдена от усилия сжатия $F_э$:

1 — никель НП2, $d = 0,5 \pm 0,5$ мм; 2 — платинит, $d = 0,4 \pm 0,4$ мм; 3 — молибден, $d = 0,5 \pm 0,5$ мм; 4 — платинит, $d = 0,4$ мм и молибден, $d = 0,5$ мм; 5 — никель НП2 и молибден, $d = 0,5$ мм; 6, 7 — никель НП2, $d = 0,5$ мм и платинит, $d = 0,4$ мм (6 — $l'_{вд}$ на платините, 7 — $l'_{вд}$ на никеле).

поверхности вдавливания¹, тем выше должно быть значение $Q_{с.т.}$.

Экспериментальные исследования [132] по определению зависимости размера поверхностей вдавливания (которая в первую очередь характеризуется шириной вмятины на детали) от твердости материала и усилия сжатия, подтверждают (рис. 24), что при уменьшении твердости и увеличении F_3 закономерно и довольно заметно возрастают значения ширины вмятины $l'_{вд}$ и $l''_{вд}$, а значит, и размеры поверхностей вдавливания. Поэтому для стабильности $Q_{с.т.}$ необходимо, чтобы детали данной марки имели одинаковую твердость и сваривались при стабильном усилии сжатия.

3. Факторы, влияющие на изменения тепла, выделяющегося в зоне микросварки

Нарушение процесса тепловыделения в зоне микросварки обуславливается изменением следующих параметров: контактного сопротивления между свариваемыми деталями (в зависимости от способа подготовки поверхностей деталей и их состояния к моменту подачи на сварку), а также абсолютного значения усилия сжатия и его отклонений от оптимальной величины, обусловленных конструкцией и условиями эксплуатации механизма сжатия конкретной машины для контактной микросварки и др.; контактных сопротивлений электрод — деталь и технологически допустимых отклонений их значений, поскольку от этого во многом зависит не только внешний вид сварных соединений и работоспособность рабочих частей электродов, но нередко и возможность получения качественных микросварных соединений; собственного сопротивления свариваемых деталей $2R_d$; фактических размеров площадок смятия при микросварке деталей круглого сечения между собой и с плоскими деталями; времени сварки.

Кроме того, на количество тепла $Q_{з.с}$ оказывает влияние предварительный подогрев свариваемых деталей (если он применяется) и некоторые другие факторы.

Изменение общего сопротивления зоны сварки $R_{з.сх}$ и его составляющих. Известно [130, 132], что изменения общего сопротивления в зоне сварки металлов малых толщин $R_{з.сх}$ и его составляющих являются причиной нестабильности тепловыделения в деталях в первоначальный момент сварки, а затем приводят к различному температурному состоянию металла в сварной точке и перераспределению внутренних источников тепла.

Зравнение по стабильности точечных машин для микросварки конденсаторного типа и переменного тока 50 Гц показывает, что при

¹ Обычно при рельефно-точечной конденсаторной микросварке глубина вдавливания на деталях круглого сечения до прохождения сварочного тока составляет не более 0,1—0,2 их диаметра, а вмятина в плоских деталях от контактирующих с ними более твердых круглых деталей бывает еще меньшей.

обычных значениях общего сопротивления $R_{з.с.х} \geq 10^{-3}$ Ом значительно лучшая стабильность тепла в начальной стадии нагрева в зоне микросварки при изменениях $R_{з.с.х}$ обеспечивается [130, 221] на конденсаторных машинах (рис. 25). Анализ кривых подтверждает, что при точечной микросварке на переменном токе ввиду значительно большей крутизны средней части кривой 1 (по сравнению с кривой 2) имеют место существенные изменения абсолютных значений тепла $\Delta Q_{з.с.}$ в начальной стадии нагрева (даже при незначительных отклонениях сопротивления $R_{з.с.х}$ от заданного его значения по режиму сварки), а при выполнении точечной микросварки на конденсаторных машинах это проявляется в значительно меньшей мере. При $R_{з.с.х} < 10^{-3}$ Ом (менее характерная область микросварки) существенной разницы в стабильности микросварки между машинами переменного тока и конденсаторными не наблюдается.

Рассматривая в целом вопрос о причинах, обуславливающих большие абсолютные значения $R_{з.с.х}$ при конденсаторной микросварке сопротивлением, необходимо отметить следующее.

Известно, что в соответствии с основными положениями теории контактной сварки сопротивлением [12, 52, 97, 108, 109] и, в частности, с критериями подобия [119, 179] усилию сжатия F_3 значительно снижается с уменьшением толщины свариваемых деталей. Вместе с тем общепризнано [52, 125, 137, 225], что контактное сопротивление деталь — деталь $R_{д.д.х}$ является величиной, обратно пропорциональной усилию сжатия F_3 . Следовательно, и переходные контактные сопротивления электрод — деталь $R_{э1д1х}$ и $R_{э2д2х}$ также (в случае неизменности остальных условий) обратно про-

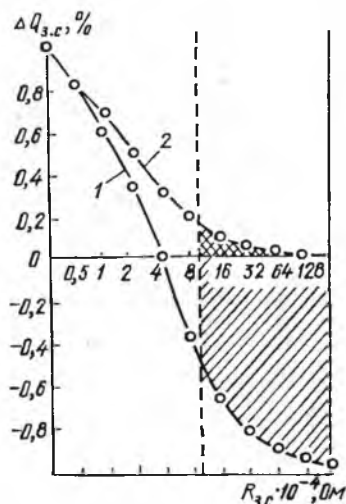


Рис. 25. Зависимость изменения количества тепла $\Delta Q_{з.с.}$ от $R_{з.с.х}$ при сварке на точечных машинах переменного тока ИТМ-0,4 (1) и конденсаторной ТКМ-7 (2).

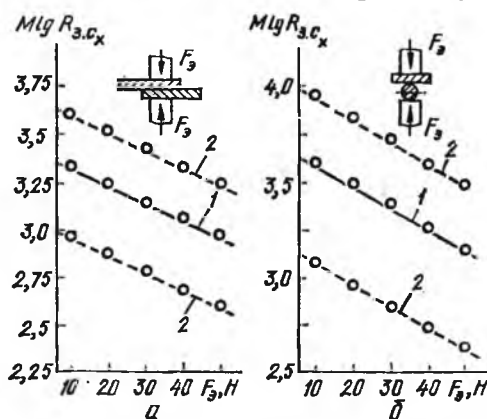


Рис. 26. Линия регрессии $M \lg R_{з.с.х}$ (1) и доверительные интервалы (2) в зависимости от усилия сжатия F_3 ($R_{з.с.х}$, мкОм):

а — лист из никеля НП2, $\delta = 0,09 \pm 0,09$ мм; б — проволока из молибдена, $d = 0,5$ мм и лист из никеля НП2, $\delta = 0,09$ мм.

порциональны этому усилию. Поэтому при микросварке сопротивление $R_{a.c.x}$ имеет большие абсолютные значения, причем разброс его значений довольно велик (рис. 26).

Исследования [171] показали, что при контактной сварке сопротивление $R_{дл.x}$ является функцией класса чистоты ее поверхности, причем чем выше этот класс, т. е. чем меньше высота микронеровностей на поверхности, тем больше $R_{дл.x}$ и наоборот. Поскольку при конденсаторной микросварке, как правило, применяются металлы малых толщин и сечений с высокими классами чистоты поверхностей, здесь имеет место закономерное увеличение $R_{дл.x}$, что также обуславливает увеличение суммарного сопротивления $R_{a.c.x}$.

Переходные контактные сопротивления $R_{a1д1.x}$ и $R_{a2д2.x}$ при конденсаторной микросварке, как и сопротивление $R_{дл.x}$, также имеют довольно большие абсолютные значения, причем каждое из этих сопротивлений может составлять не только величину, равную или меньшую $0,5R_{дл.x}$, но нередко (в основном в зависимости от материала рабочих частей электродов и состояния их поверхностей) иметь значения $0,3—1,0R_{дл.x}$ [33]. Поэтому при точечной и рельефной конденсаторной микросварке доли тепла $Q_{a1д1}$ и $Q_{a2д2}$ могут составлять существенную часть общего тепла $Q_{a.c.}$.

Принимая во внимание безусловное влияние на баланс тепла в зоне микросварки контактного сопротивления $R_{дл.}$, следует отметить, что поскольку в ряде случаев на сопротивлениях $R_{a1д1}$ и $R_{a2д2}$ также могут выделяться довольно значительные, а иногда и равные теплу $Q_{дл.}$ количества тепла $Q_{a1д1}$ и $Q_{a2д2}$, то это обуславливает такие особенности контактной микросварки: при существенной доле тепла $Q_{a1д1}$ и $Q_{a2д2.x}$ возможны недопустимые по условиям технологии перегрев поверхностей свариваемых деталей и быстрая порча рабочих частей электродов, что вызывает необходимость не только уменьшать сопротивления $R_{a1д1.x}$ и $R_{a2д2.x}$, но и стабилизировать их значения; при значительном влиянии тепла $Q_{a1д1}$ и $Q_{a2д2}$ на стабильность качества контактной микросварки может потребоваться не только более жесткая технология ее выполнения, но и удовлетворение некоторых повышенных требований к состоянию поверхности материала деталей в процессе их производства.

Важно также отметить, что в ряде случаев технологическая необходимость уменьшения сопротивлений $R_{a1д1.x}$ и $R_{a2д2.x}$ и обеспечения практической неизменности условий охлаждения свариваемых деталей между электродами при выполнении конденсаторной микросварки требует не только высокого качества поверхностей рабочих частей электродов, но и плотного их прилегания к свариваемым деталям. Это в равной мере относится как к электродам с плоскими контактными поверхностями, так и к электродам с выемками (углублениями) для сварки проволок, контактов и др.

Экспериментальные исследования также показали, что с увеличением усилия F_z против оптимального значения (когда разрывные усилия F_p имеют наибольшие значения) прочность сварных точек (см.

рис. 16, б, в) уменьшается, причем процентное снижение прочности (коэффициент k_{F_p} , %) возрастает с уменьшением толщины свариваемого металла. Это связано с существенным ростом величины сопротивления $R_{длх}$ с уменьшением толщины свариваемого металла (ввиду необходимости снижать усилие сжатия F_s).

Следует отметить, что при контактной микросварке (как и при контактной сварке металлов $\delta > 0,5$ мм) от усилия F_s зависят не только контактные сопротивления $R_{длх}$ и $2R_{элх}$, но и начальное собственное сопротивление свариваемых деталей $2R_{лх}$. Это подтверждено (рис. 27) экспериментально [130] в соответствии с методикой [50] и объясняется «ситовым» характером контакта, при котором элементарные микроконтакты разбросаны по площади, ограниченной диаметром электрода d_a (с ростом F_s увеличиваются размеры и количество микроконтактов). Однако в случаях когда при микросварке контактные сопротивления $R_{длх}$ и $2R_{элх}$ значительно больше $2R_{лх}$, влияние изменения количества тепла $2Q_{п}$ на прочность F_p и коэффициент k_{F_p} при изменении F_s можно считать несущественным [132].

Таким образом, с уменьшением толщины свариваемого металла и возрастанием роли тепла на контактных сопротивлениях в общем балансе тепла зоны сварки $Q_{з.с}$ стабилизация состояния поверхностей деталей и контактных поверхностей электродов, а также усилия сжатия F_s становится все более необходимой.

Размеры площадок электроды — детали и деталь — деталь. При точечной контактной сварке сопротивлением изменение величины площадок контактирования электроды — детали и деталь — деталь обуславливается изменениями в основном размеров контактной поверхности электродов d_a , а именно: увеличением (в связи с расклепыванием) или уменьшением (при заправке, окислении, загрязнении, несоосности и перекосе рабочих частей электродов и др.). Эти факторы обуславливают в первую очередь изменение значений собственных $2R_{лх}$ и общего $R_{з.сх}$ сопротивлений зоны сварки. Их влияние на тепло $Q_{з.с}$ при конденсаторной микросварке показано в гл. II. Ниже рассмотрена непосредственная зависимость тепла от изменения диаметра d_a .

В соответствии с формулой (II.41) и уравнением (III.5) рост диаметра d_a вызывает увеличение диаметра ядра сварной точки d_n . Тогда согласно уравнению (II.41) для получения точки несколько большего размера необходимо увеличить количество тепла $Q_{д.с}$, расходуемого на нагрев центрального столбика. Однако в данном случае общее количество требуемого для сварки тепла $Q_{св}$ возрастет и за счет

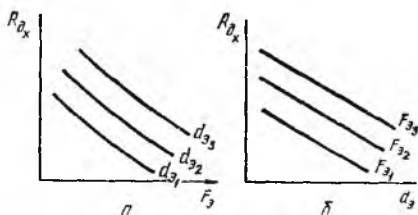


Рис. 27. Зависимость сопротивления $R_{дх}$ от усилия сжатия F_s при $d_{a1} > d_{a2} > d_{a3}$ (а) и диаметра d_s при $F_{s1} > F_{s2} > F_{s3}$ (б).

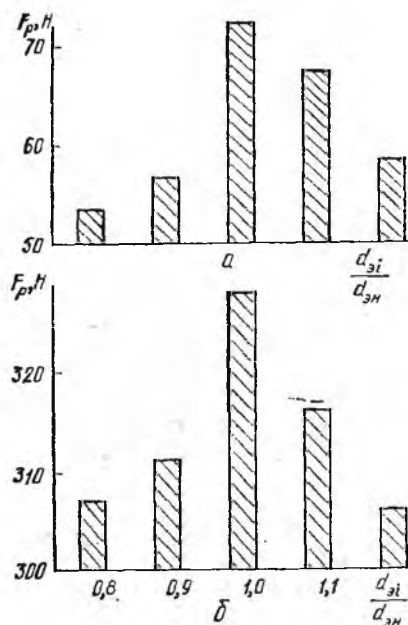


Рис. 28. Зависимость разрывного усилия F_p от относительного $\frac{d_{ai}}{d_{an}}$ изменения диаметра контактной поверхности электрода при точечной микросварке бронзы БрНБТ1,7 [132]:
 а — $\delta = 0,1 + 0,1$ мм; б — $\delta = 0,26 + 0,26$ мм.

Однако при выполнении точечной конденсаторной микросварки такими электродами не исключено, что в процессе их эксплуатации диаметр d_a станет большим (в связи с расклепыванием рабочей части электрода) или меньшим (после зачистки и заправки) своего номинального значения d_{an} , что в первую очередь должно повлиять на размеры сварных точек, а значит, и на прочностные характеристики сварных соединений.

Последнее положение было проверено экспериментально при точечной конденсаторной сварке металлов малой толщины электродами с номинальным диаметром и отклонениями от него на $\pm 10\%$ и $\pm 20\%$ (диаметр d_{ai}) при всех прочих равных условиях. Поверхность деталей перед сваркой подвергалась химической обработке. После сварки проводились механические испытания образцов на разрыв, на основе которых построены зависимости (рис. 28) разрывного усилия на точку от отношения d_{ai}/d_{an} , характеризующего степень отклонения данного значения d_{ai} от его номинального значения d_{an} ($d_{ai}/d_{an} = 1$ при условии сохранения неизменности диаметра электродного контакта).

Полученные результаты показывают, что при точечной конденсаторной микросварке изменения на $\pm 10\text{--}20\%$ диаметра контак-

увеличения потерь в зону термического влияния $Q_{зтв}$ и электроды Q_e . В случае уменьшения диаметра рабочей части электродов $Q_{п.с}$, $Q_{зтв}$ и Q_e изменяются в противоположную сторону. Таким образом, изменение диаметра d_e должно влиять на размеры сварных точек, а значит, и на прочностные характеристики соединений.

Практикой применения в отечественном приборостроении серийных точечных конденсаторных машин типов ТКМ-4, ТКМ-7 и ТКМ-8, ТКМ-14, ТКМ-15, ССП-3 и др. установлено, что при прочих равных условиях они обеспечивают высокую стабильность точечной сварки металлов малых толщин благодаря использованию электродов с цилиндрической рабочей частью. Это обусловлено тем, что в связи с практическим постоянством у таких электродов величины контактной поверхности ($d_e = \text{const}$) в значительной мере облегчается получение требуемого по условиям стабильности равенства между количеством тепла $Q_{в.с}$ и $Q_{с.т}$ (см. (III.4)).

ной поверхности электрода обуславливают закономерное снижение прочности сварных точек по сравнению с максимальным значением разрывного усилия $F_{p\max}$ (при $d_{\text{эл}}/d_{\text{вн}} = 1$).

Существенное различие в процентном уменьшении прочности сварных соединений по сравнению с $F_{p\max}$ в случаях точечной сварки бронзы толщиной $0,1 + 0,1$ мм (18,5—27,4 % при изменении диаметра $d_{\text{вн}}$ на ± 20 %) и толщиной $0,26 + 0,26$ мм (6,4—7,0 % при таком же изменении диаметра) указывает на то, что при точечной конденсаторной микросварке с уменьшением толщины металла требования к постоянству диаметра контактной поверхности электрода должны повышаться.

Изменение твердости свариваемых деталей. В работах [51, 225] установлено, что при непостоянстве твердости свариваемых материалов изменяются площади контактирования деталь — деталь $S_{\text{дл}}$ и электрод — деталь $2S_{\text{эл}}$ (воспринимающие усилие сжатия $F_{\text{с}}$), а также суммарные площади токопроводящих α -пятен. Поэтому сопротивление $R_{\text{длх}}$ зависит от твердости свариваемых материалов, а сопротивление $2R_{\text{элх}}$ — от твердости материала электродов и контактирующих с ними свариваемых материалов.

При шаровой поверхности соприкосновения в зоне сварки материалов с одинаковой твердостью HB контактное сопротивление [125, 225]

$$R_{\text{длх}} = 0,89\rho_{\text{с.м}} \sqrt{\frac{HB}{F_{\text{с}}}}, \quad (\text{III.6})$$

а материалов с различной твердостью

$$R_{\text{элх}} = \frac{\rho_{\text{с.м}} + \rho_{\text{э.м}}}{2} = \sqrt{\frac{HB'}{F_{\text{с}}}}, \quad (\text{III.7})$$

где $\rho_{\text{с.м}}$ и $\rho_{\text{э.м}}$ — соответственно удельные сопротивления свариваемого и электродного контактирующих материалов; HB' — твердость более мягкого из этих материалов.

Влияние различной твердости при нагреве на процесс конденсаторной микросварки (при этом для исключения влияния различных начальных условий на тепловыделение выдерживалось постоянство $R_{\text{э.с}} = \text{const}$) исследовалось на сочетаниях никель НП2 $d = 0,5 + 0,5$ мм (рельефно-точечная микросварка) и бронза БрБ2,5 $\delta = 0,078 + 0,078$ мм (точечная микросварка), причем образцы из никеля имели твердость HB , равную 1,24 и 2,02 ГПа, а из бронзы — 1,5 и 3,2 ГПа.

Анализ вольт-амперных характеристик зоны сварки, кривых $i_{\text{з.с.}}$, $i_{\text{св.}}$, $p_{\text{з.с.}}$, $w_{\text{з.с.}}$ для проволок (рис. 29, а, б) показал, что эти характеристики незначительно отличаются друг от друга. Однако при большей микротвердости (рис. 29, в) жидкий металл был выдавлен из зоны контакта и сварка произошла в твердом состоянии за счет диффузионного схватывания контактирующих поверхностей. При сварке деталей с меньшей микротвердостью соединение получилось в жидком состоянии (рис. 29, г), а большая площадка вдавливания и более развитая зона образования соединения затрудняют при

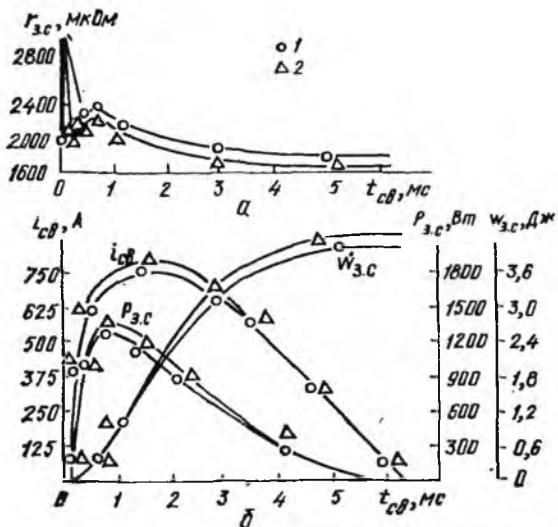
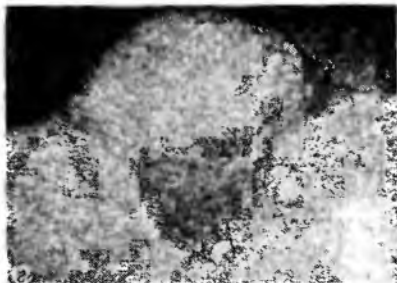


Рис. 29. Зависимости параметров сварки от времени $t_{св}$ при рельефно-точечной микросварке никеля НП2, $d = 0,5 + 0,5$ мм (1 — $HV = 2,02$ ГПа; 2 — $HV = 1,24$ ГПа) и структуры соединений ($\times 100$): а — сопротивление r_{3c} ; б — ток $i_{св}$; в — мощность P_{3c} ; г — энергия w_{3c} ; 1 — соединение 1; 2 — соединение 2.



малых усилиях выдавливание жидкого металла. Это обусловило возникновение ряда нежелательных кристаллизационных дефектов типа рыхлостей, пор, межкристаллитных трещин. Однако, несмотря на указанные дефекты, прочностные характеристики и коэффициенты надежности соединений с $HV = \text{var}$ (в исследованных пределах) высокие и незначительно отличаются друг от друга (табл. 6).

Анализ вольт-амперных характеристик, кривых r_{3c} , $i_{св}$, P_{3c} и w_{3c} , полученных, например, при сварке бронзы $\delta = 0,078 + 0,078$ мм, показывает, что при большей твердости наблюдается заметное увеличение максимального значения сопротивления r_{3c} расплавленного металла, что, конечно, связано с нагревом. Мгновенное падение напряжения между электродами в этот момент $u_{св}$ достигает максимума. Следовательно, можно предположить, что температура расплавленной бронзы с $HV = 3,2$ ГПа выше, чем бронзы с $HV = 1,5$ ГПа. Более высокие значения r_{3c} для бронзы с $HV = 3,2$ ГПа можно объяснить тем, что размягчение (расплавление) микровыступов и увеличение зоны контактирования у более твердого материала происходят медленнее. Это обуславливает повышение температуры в зоне образования соединения и, следовательно, уве-

Таблица 6. Значения коэффициентов надежности микросварных соединений при различной твердости металла

Материал, толщина (диаметр), мм	Испытуемые образцы	$HВ$, ГПа	$\bar{F}_{р.н}^{ро}$	$S, н$	$\bar{Y}$	$Y_y (=)$	$Y_y (\mp)$
Никель НН2, $d = 0,5$	Из основного металла	2,02	105,71	4,23	—	—	—
		1,24	99,23	0,77	—	—	—
	Рельефно-точечные	2,02	95,35	5,47	0,902	0,868	0,739
		1,24	90,75	3,46	0,915	0,858	0,832
Бронза БрБ2,5, $\delta = 0,078$	Из основного металла	1,50	44,64	2,33	—	—	—
		3,20	42,43	2,46	—	—	—
	Точечные	1,50	43,40	3,10	0,973	0,931	0,755
		3,20	39,35	3,48	0,928	0,863	0,684

личение сопротивления $r_{з.с}$ (за счет повышения удельного сопротивления). Мгновенные значения мощности $p_{з.с}$ и энергии $w_{з.с}$ для бронзы с $HВ = 3,2$ ГПа также получают более высокими.

Исследование микроструктур указанных соединений (рис. 30) показало, что при точечной микросварке листового материала с повышением твердости увеличивается в первую очередь такой параметр ядра сварной точки, как глубина проплавления (с 70 % у бронзы с $HВ = 1,5$ ГПа до 88 % у бронзы с $HВ = 3,2$ ГПа). Диаметр ядра сварной точки изменяется весьма незначительно (соответственно с 0,37 до 0,4 мм). Коэффициенты надежности (см. табл. 6) соединений из бронзы с разной твердостью также незначительно отличаются друг от друга. Аналогичные результаты получены при точечной и рельефной конденсаторной микросварке других материалов,

На основании проведенных экспериментов можно сделать вывод, что для обеспечения стабильности выделения тепла $Q_{з.с}$ при прочих



Рис. 30. Структура точечного микросварного соединения бронзы БрНБТ1,7 толщиной $0,078 \pm 0,078$ мм, $\times 180$:

а — $HВ = 1,5$ ГПа; б — $HВ = 3,2$ ГПа.

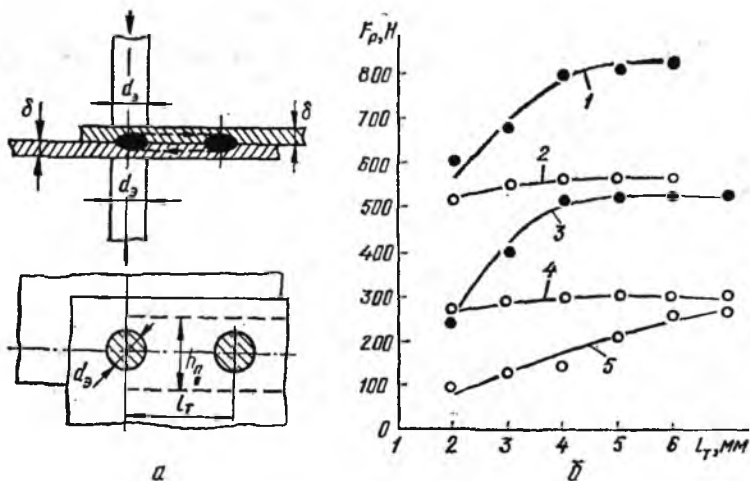


Рис. 31. Шунтирование тока $i_{св}$ через ранее сваренную точку (а) и зависимость разрывного усилия F_p от шага l_r (б) при точечной конденсаторной микросварке: 1 — сталь Ст 10, $\delta = 0,5 + 0,5$ мм; 2 — сталь 12Х18Н9Т, $\delta = 0,2 + 0,2$ мм; 3 — бронза БрОФ6,5—0,4, $\delta = 0,35 + 0,35$ мм; 4 — латунь Л63; $\delta = 0,25 + 0,25$ мм; 5 — алюминий А97, $\delta = 0,5 + 0,5$ мм.

равных условиях, а следовательно, стабильности процесса конденсаторной микросварки необходимо, чтобы отклонения твердости свариваемых материалов были минимальными.

Шунтирующие контакты. Известное [8, 132] влияние шунтирующих контактов (близко расположенных сварных точек и случайных контактов) на тепло $Q_{с.с}$ возможно и при точечной конденсаторной микросварке, однако при этом имеются некоторые особенности, связанные в первую очередь с малой толщиной свариваемых деталей.

В работе [112] было показано, что распределение тока шунтирования при точечной сварке происходит по эквивалентной полосе шириной h_n и толщиной δ , равной толщине свариваемых деталей (рис. 31, а). Ширина этой полосы определяется по формуле [112]

$$h_n = \frac{\pi l_r}{\ln \frac{2l_r}{d_s}}, \quad (\text{III.8})$$

где l_r — шаг сварных точек (расстояние между их центрами); d_s — принимается равным диаметру ядра точки.

Пренебрегая сопротивлением сварной точки, можно рассчитать сопротивление металла между двумя точками для двух одинаковых пластин толщиной δ каждая по такой формуле [112]:

$$r_{ш} = \frac{2\rho_{с.м} l_r}{\delta h_n}, \quad (\text{III.9})$$

где $\rho_{с.м}$ — удельное сопротивление свариваемого металла.

Тогда из последних двух формул можно получить [135]:

$$r_{\text{ш}} = \frac{2\rho_{\text{с.м}}}{\pi\delta} \ln \frac{2l_{\text{т}}}{d_{\text{а}}}. \quad (\text{III.10})$$

Формула (III.10) показывает, что сопротивление $r_{\text{ш}}$ обратно пропорционально величинам $d_{\text{а}}$ и δ . Поэтому при точечной конденсаторной микросварке, когда значения δ составляют десятые и даже сотые доли миллиметров, а $d_{\text{а}}$ обычно не более 2—2,5 мм [132, 137, 142], имеет место значительное увеличение сопротивления $r_{\text{ш}}$. Это позволяет производить точечную конденсаторную сварку металлов малых толщин без снижения прочности соединений при довольно небольшом шаге точек, что имеет большое практическое значение при изготовлении мелких изделий, свариваемых двумя и более точками.

Указанное выше влияние шунтирования тока на прочность соединений из металлов малых толщин экспериментально исследовано при точечной конденсаторной микросварке ряда материалов [132, 135, 142]. В этих опытах партии образцов сваривались двумя точками, расположенными друг от друга на расстояния 2, 3, 4, 5, 6 и 7 мм. Первая точка, которая сваривалась без шунтирования тока, клеймилась, лишь после этого сваривалась вторая точка. Затем первая точка высверливалась и готовые образцы с оставшейся точкой (сваренной с шунтированием тока через высверленную точку) испытывались на разрыв. Кроме того, партия образцов сваривалась только одной точкой (для получения сравнительных данных).

Средняя величина разрушающей нагрузки на точку, сваренную при наличии шунтирования тока, сравнивалась с прочностью точки, сваренной без шунтирования тока. Было принято, что при равнопрочности таких точек явление шунтирования тока практически не имеет места.

Проведенные исследования и опыт внедрения показывают (рис. 31, б), что влияние шунтирования тока на прочность точек при сварке металлов малых толщин сказывается в зависимости от марки металла только при таких шагах точек (для пакета из двух листов одинаковой толщины): $l_{\text{т}} \leq 1,5 \div 2,5$ мм при толщине каждого из листов до 0,1 мм и $d_{\text{а}} = 1,25$ мм; $l_{\text{т}} \leq 2 \div 4$ мм при толщине листов 0,2—0,3 мм и $d_{\text{а}} = 1,5$ мм; $l_{\text{т}} \leq 3 \div 7$ мм при толщине листов 0,4—0,5 мм и $d_{\text{а}} = 2,0$ мм.

Однако если при конденсаторной микросварке влияние соседних сварных точек можно в значительной мере учесть заранее, то менее определенным и практически не поддающимся предварительному учету [8] является шунтирующее действие случайных контактов близ сварных точек. Тем не менее по сравнению с точечной сваркой металлов толщиной 0,8—1 мм и более [8] при точечной конденсаторной микросварке ввиду малой толщины деталей имеет место заметное увеличение сопротивления на пути тока шунтирования и через случайные контакты, что, конечно, облегчает ее выполнение на практике.

Влияние на стабильность конденсаторной микросварки других факторов. Известно [8, 12, 49, 52, 97], что напряжение на первичной

обмотке сварочного трансформатора U_1 является важнейшим фактором, определяющим количества тепла $Q_{з.с.}$, поскольку от него при данном коэффициенте трансформации k_t зависит напряжение на вторичной обмотке U_2 , а значит, при прочих равных условиях и сварочный ток $I_{св.}$.

В оборудовании для контактной сварки переменным током первичная обмотка сварочного трансформатора непосредственно подключается к питающей сети. Однако в большинстве типов оборудования, используемого в промышленности, стабилизация сварочного тока при колебаниях напряжения сети U не обеспечивается. Поэтому закономерны значительные изменения тепла $Q_{з.с.}$ и получение сварных соединений с непроварами, выплесками и пережогами.

В конденсаторных сварочных машинах напряжение питающей сети поступает не на первичную обмотку сварочного трансформатора, а на вход зарядного устройства, причем все серийно выпускаемые с 1957 г. конденсаторные машины обеспечивают довольно строгую стабилизацию U_c при колебании напряжения U . Так как здесь погрешность стабилизации не превышает 1,5–2 %, изменение U не оказывает (если другие условия постоянны) практического влияния на тепло $Q_{з.с.}$, а значит, и на качество сварных соединений.

В соответствии с законом Ленца—Джоуля постоянство выделяемого тепла $Q_{з.с.}$ при прочих равных условиях может быть получено только при неизменности $t_{св.}$.

Современная аппаратура управления сварочным током контактных машин переменного тока [4, 175, 179] позволяет вполне надежно обеспечивать время сварки $t_{св.}$, если оно равно одному и более полупериодам переменного тока 50 Гц. Однако практически и в соответствии с критериями подобия [179] при контактной микросварке необходимо время $t_{св.}$ меньше 0,01 с. Поэтому при микросварке на переменном токе [77] часто используют те или иные способы и схемы «дробления» одного полупериода этого тока, которые не всегда обеспечивают требуемую точность значений времени $t_{св.} < 0,01$ с [179], а значит, и дозирования количеств тепла $Q_{з.с.}$.

Постоянство времени $t_{св.}$ при его значениях, меньших 0,01 с, просто и надежно обеспечивается при конденсаторной сварке. В этом случае стабильность $t_{св.}$ на данном режиме сварки в основном обеспечивается неизменностью значений емкости конденсаторов и коэффициента трансформации сварочного трансформатора.

При точечной и рельефной конденсаторной сварке нарушение ряда условий ее выполнения (даже если обеспечивается равенство $Q_{з.с.} = Q_{с.т.}$ и учтены все изложенные выше факторы) может привести к неустойчивости этого процесса и способствовать образованию выплесков и других дефектов (пор, раковин, трещин).

Известно [40, 52, 60, 175], что при контактной сварке возможны начальный и конечный выплески расплавленного металла. Начальные внутренний и наружный выплески образуются при повышенных значениях сопротивлений $R_{длх}$ и $2R_{здх}$ (в основном из-за плохой подготовки поверхности деталей и малых усилий сжатия F_s), чрезмерно высокой скорости ввода тепла в зону сварки, неправильной

установке электродов (несоосность и непараллельность рабочих поверхностей), нетехнологичном взаимном расположении свариваемых деталей и последних относительно электродов, неправильном выборе материала и размеров рабочих частей электродов, плохом состоянии рабочей поверхности электродов и др.

Конечный внутренний выплеск наблюдается при значительном увеличении давления внутри жидкого металла ядра и разрыве перегретым расплавленным металлом уплотняющего кольца вокруг него (при контактной сварке листовых деталей) или взрыве жидкой оболочки также перегретого расплавленного металла при открытой зоне плавления.

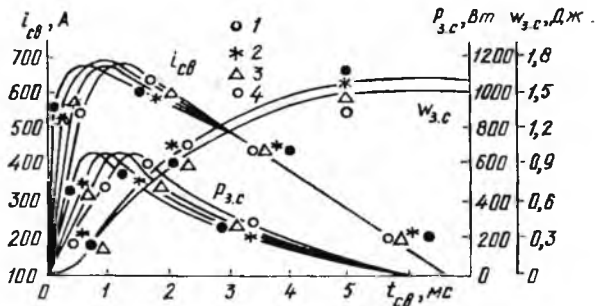


Рис. 32. Зависимости тока i_{cv} , мощности p_{zc} и энергии w_{zc} от времени t_{cv} при конденсаторной сварке с различной скоростью ввода тепла в зону соединения платинита, $d = 0,4$ мм с никелем НП2, $d = 0,4$ мм (1 — $\alpha = 87^\circ$; 2 — $\alpha = 84^\circ$; 3 — $\alpha = 81^\circ$, 4 — $\alpha = 78^\circ$).

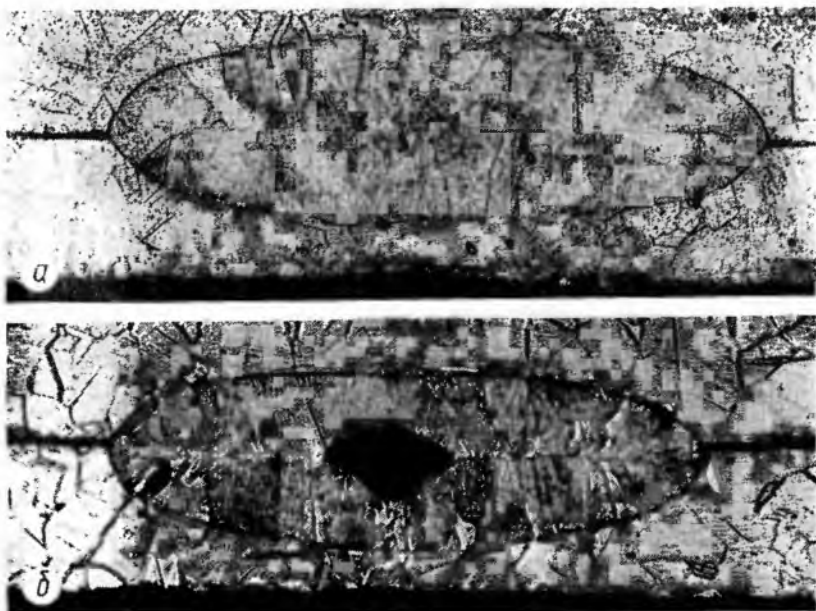


Рис. 33. Структура точечного микросварного соединения никеля НП2, $\delta = 0,1 + 0,1$ мм при различной скорости ввода тепла ($\times 200$): а — $\alpha = 73^\circ$, б — $\alpha = 82^\circ$.

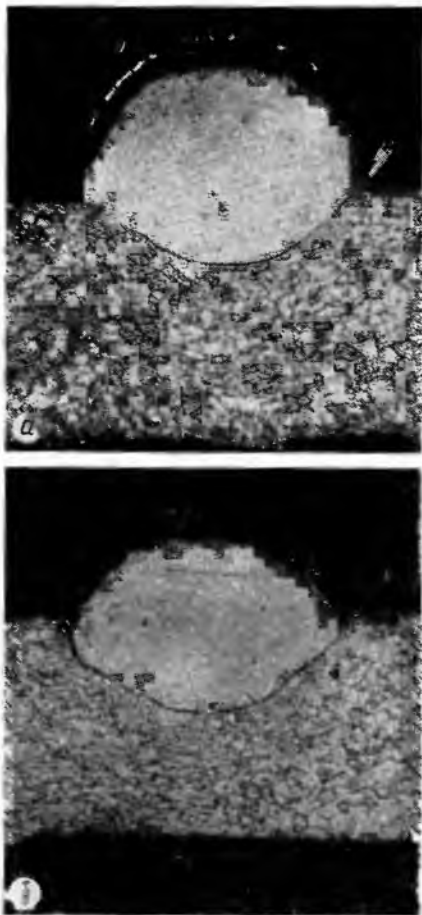


Рис. 34. Структура рельефно-точечного микросварного соединения платинита, $d = 0,4$ мм с никелем НП2, $d = 0,4$ мм при различной скорости ввода тепла ($\times 100$):

а — $\alpha = 78^\circ$, б — $\alpha = 87^\circ$.

в зоне сварки в начале нагрева. Такое развитие сварочного процесса, для которого характерно уменьшение времени t_a достижения током максимального значения, обуславливает появление начального внутреннего выплеска жидкого металла, а также образование раковин (рис. 33) и значительной деформации деталей (рис. 34).

В связи с тем что скорость ввода тепла в указанных выше экспериментах изменялась в небольших пределах (чтобы не вызвать су-

При сварке большинства изделий радиоэлектроники и точного приборостроения недопустим как начальный, так и конечный выплеск, поскольку застывшие частицы металла вызывают короткие замыкания в функциональных элементах электронных приборов, заклинивание подвижных систем в других изделиях, искажение сигналов и др.

Образование конечного внутреннего выплеска, в частности, связано с изменением факторов, обуславливающих нарушение равенства $Q_{з.с} = Q_{с.т}$ (когда создаются условия неравенства вида $Q_{з.с} > Q_{с.т}$). Вместе с тем для получения бездефектных соединений необходимо обеспечивать при сварке конкретных деталей не только $Q_{з.с} = Q_{с.т}$, но и определенный закон ввода тепла в зону сварки.

Ниже показано влияние изменения скорости ввода тепла в зону соединения¹ при сварке никеля НП2 толщиной $0,1 + 0,1$ мм (точечная микросварка) и платинита диаметром $0,4$ мм с никелем диаметром $0,4$ мм (рельефно-точечная микросварка) на стабильность и качество процесса (рис. 32). С увеличением скорости ввода тепла (за счет роста угла α , а значит, и более крутого переднего фронта импульса сварочного тока) раньше наступает максимум на кривой мощности $p_{з.с}$ и заметно растет количество энергии $w_{з.с}$, выделяемой

¹ Эта скорость характеризуется углом α , от которого прямо пропорционально зависит $di_{св}/dt_{св}$.

Таблица 7. Значения коэффициентов надежности микросварных соединений при различных значениях угла α

Материал, толщина (диаметр)	Испытуемые образцы	α , град	$\bar{F}_{\text{ро}}$, Н	S. H	$\bar{Y}$	Y_{γ} (=)	Y_{γ} (±)
Никель НП2, $\delta = 0,1 + 0,1$ мм	Из основного металла	—	46,33	1,82	—	—	—
		73	42,71	2,50	0,921	0,883	0,754
	Точечные	77	43,71	2,92	0,943	0,887	0,757
		80	44,90	3,37	0,969	0,893	0,763
		82	45,38	3,55	0,979	0,896	0,765
Никель НП2, $d = 0,4$ мм + + платинит. $d = 0,4$ мм	Из основного металла	—	61,14	1,44	—	—	—
		78	59,19	2,53	0,968	0,929	0,845
	Рельефно-точечные	81	58,71	2,99	0,960	0,905	0,823
		84	58,38	3,12	0,954	0,894	0,814
		87	58,19	3,43	0,951	0,880	0,801

Примечание. Значение угла α характеризует крутизну переднего фронта кривой сварочного тока (см. рис. 32).

щественных изменений тепла $Q_{\text{з.с.}}$, в наших экспериментах отклонения $\Delta Q_{\text{з.с.}}$ составляли не более 5—7 %) параметры сварных точек, прочностные характеристики и коэффициенты надежности (табл. 7) указанных выше соединений незначительно отличаются друг от друга.

Для обнаружения выплесков использовалась регистрация в процессе сварки на экране осциллографа побочных явлений, сопровождающих выплеск, — скачкообразного увеличения падения напряжения в зоне сварки или колебаний (частотой 20—50 кГц) на кривой давления ударной волны (эта кривая снималась с помощью пьезоэлектрического преобразователя, который был установлен на неподвижном электроде [220, 279—282]).

Образование выплесков жидкого металла при точечной и рельефной сварке может быть вызвано также низкими динамическими характеристиками (большая масса подвижной части, несущей электрод, и значительные силы трения при ее перемещении в опорах) механизма сжатия электродов [208, 210]. Для обеспечения малых и постоянных сил трения при перемещении подвижной системы с электродом, а также соосности рабочих частей электродов в настоящее время широко используются опоры качения [57, 105, 165]. Поэтому влияние динамических характеристик механизма сжатия электродов на процесс формирования соединений исследовалось нами только при различной массе его подвижной части.

В качестве датчика для измерения статического и динамического усилий на электродах применялись угольные шайбы, жестко соединенные с неподвижным (нижним) электродом. Падение напряжения на этих шайбах, подключенных по мостовой схеме к источнику тока, определяется их сопротивлением, которое пропорционально усилию $F_{\text{з.}}$.

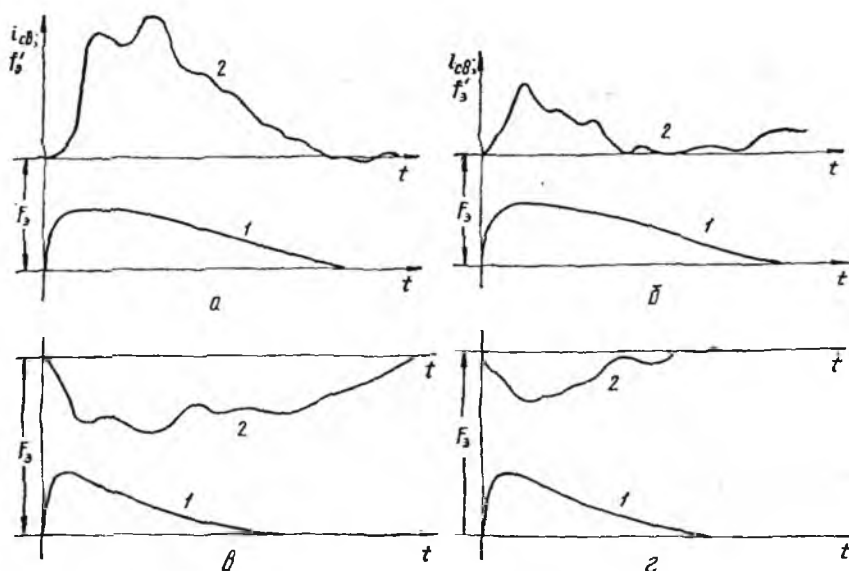


Рис. 35. Сварочный ток $i_{св}$ (1) и усилие реакции нижнего электрода f'_2 (2) при конденсаторной микросварке с различной массой подвижной системы механизма сжатия.

До включения сварочного тока усилие F_2 уравнивается реакцией нижнего электрода, т. е. усилием F'_2 :

$$F'_2 = \sigma_n S_n = F_2. \quad (\text{III.14})$$

где σ_n — давление, создаваемое в контакте усилием F_2 ; S_n — площадь контакта.

При сварке с массой подвижной системы 2 кг (создающей усилие на электродах F_2) пластин никеля НП2 толщиной 0,1 + 0,1 мм увеличение (за счет дилатометрического эффекта) объема металла ввиду большой инерции системы обуславливает заметное (до 126 %) и запаздывающее относительно максимума тока пиковое повышение усилия в контакте, со стабилизацией его до начального статического F_2 после окончания тока (рис. 35, а). Это может вызвать разрыв уплотняющего кольца и выплеск жидкого металла. Сварка тех же деталей с массой подвижной малоинерционной системы 0,05 кг и усилием $F_2 = 2$ даН от пластинчатой пружины обуславливает повышение усилия в контакте не более чем до 60–65 % одновременно с максимумом и снижение его до статического F_2 с окончанием импульса тока (рис. 35, б), вследствие чего выплески не наблюдаются.

При сварке проволоки из никеля НП2 $d = 0,5 + 0,5$ мм по мере нагрева деталей сопротивление деформированию уменьшается, статическое равновесие $F_2 = F'_2$ нарушается и верхний электрод перемещается вниз. При массе подвижной системы 3 кг (соответствующей

заданному F_a) скорость осадки недостаточна, уменьшение усилия (до 42 %) и его стабилизация относительно максимума и окончания тока запаздывают (рис. 35, в). Это вызывает рост сопротивления $R_{з.с.}$, перегрев металла в зоне сварки и инициирует выплески. При сварке тех же деталей с массой системы 0,05 кг и $F_a = 3$ даН, создаваемым пластинчатой пружиной, усилие F'_a уменьшается (до 20 %), стабилизируется синхронно с током (рис. 35, г) и выплесков нет.

Полученные результаты еще раз подтверждают положение [132], что при разработке подвижных систем механизмов сжатия машин для точечной и рельефной контактной микросварки тенденцией в конструировании должно быть уменьшение их массы m , т. е. возможно большее приближение к выполнению критерия подобия $m = l^5$ (l — линейный размер свариваемого металла).

На основании анализа влияния комплекса параметров и условий выполнения контактной точечной микросварки сопротивлением на ее тепловой баланс и стабильность построена табл. 8, в которой показан характер основных качественных изменений $Q_{с.т}$ и $Q_{з.с.}$, имеющих место в каждом из указанных случаев нарушения условий стабильности. Анализ табл. 8 показывает, что при точечной и рельефной конденсаторной микросварке сопротивлением причин, которые обуславливают существенное изменение теплового баланса и нарушают стабильность данного процесса, значительно больше, чем при точечной сварке металла толщиной 0,8 мм и более [8].

4. Подогрев свариваемых деталей

Выше показано существенное влияние на условия нагрева, тепловыделение и качество микросварного соединения контактных сопротивлений $R_{л\lambda x}$ и $2R_{зл\lambda x}$. Поэтому стабилизация и уменьшение абсолютных значений этих сопротивлений являются одним из наиболее важных факторов стабилизации всего процесса точечной и рельефной конденсаторной микросварки.

Способы стабилизации контактных сопротивлений. Уменьшить рассеяние и абсолютную величину начальных (холодных) сопротивлений $R_{л\lambda x}$, $R_{зл\lambda x}$ и $R_{з2\lambda x}$ можно различными способами: механическими, химическими, термическими и термомеханическими.

Большие статические усилия сжатия F_a , которые применяются при сварке металлов толщиной $\delta \geq 0,8 \div 1$ мм, неприемлемы при конденсаторной микросварке тонких металлов в связи с низкой механической стойкостью рабочих частей электродов, имеющих обычно небольшие d_{λ} и сложной конфигурацией свариваемых деталей. Неприменимо также предварительное обжатие (проковка) деталей в зоне соединения [52, 97] (увеличение перед началом сварки статического усилия сжатия F_a до усилия обжатия $F_{\infty} > F_a$ и последующее его уменьшение до значения F_a для выполнения этого процесса). Таким образом, эти механические способы обработки поверхностей деталей при точечной и рельефной конденсаторной микросварке сопротивлением являются неприемлемыми.

Таблица 8. Нарушение теплового баланса при толщине металла $\delta < 0,8$ мм

Причина нарушения	Изменение условия
Изменение силы сварочного тока, вызванное колебаниями напряжения на входных зажимах сварочного трансформатора	Плотность сварочного тока в зоне сварки увеличивается уменьшается
Изменение состояния поверхностей свариваемых деталей, обусловленное различной их подготовкой, а также различными химическим составом и толщиной пленки оксидов	Контактные сопротивления деталь — деталь и электрод — деталь увеличиваются уменьшаются
Изменение усилия сжатия, вызванное несовершенством конструкции механизма машины или его разладкой, а также плохим уходом за его подвижными частями, связанными с электродами Изменение твердости свариваемых деталей	Контактные сопротивления деталь — деталь и электрод — деталь в их холодном состоянии, а также собственные начальные сопротивления деталей уменьшаются увеличиваются Фактические размеры площадок сжатия при сварке деталей круглого сечения между собой и с плоскими деталями увеличиваются уменьшаются
Изменение времени сварки, обусловленное нечеткой работой прерывателя сварочного тока	Время нагрева металла в зоне сварки увеличивается уменьшается
Изменение диаметра (площади) электродного контакта, обусловленное износом или неправильной обработкой рабочих частей электродов	Площадь электродного контакта увеличивается уменьшается
Взаимный перекося рабочих частей электродов (при их установке или в процессе эксплуатации), а также неправильное положение деталей между электродами	Размеры площадок контактирования рабочих частей электродов с поверхностями деталей уменьшаются, причем в общем случае размеры этих площадок непостоянны
Взаимный сдвиг деталей, а также смещение рабочих частей электродов (по отношению друг к другу и к свариваемым деталям)	Размеры площадок контактирования свариваемых деталей уменьшаются или увеличиваются, а рабочих частей электродов с поверхностями этих деталей, как правило, уменьшаются

$Q_{\text{я.с}}$	$Q_{\text{с.т}}$	Характер изменений
Увеличивается Уменьшается	Не изменяется » »	Увеличивается или уменьшается нагрев в ядре сварной точки и под электродами
Увеличивается * Уменьшается *	Не изменяется » »	В зависимости от абсолютных значений $R_{\text{длх}}$, $R_{\text{з1д1х}}$ и $R_{\text{з2д2х}}$ количество тепла, выделяемое на этих сопротивлениях, может быть самым различным, что влияет на баланс тепла в ядре точки и под электродами, а также на характер образования выплесков
Уменьшается * Увеличивается *	Не изменяется » »	Уменьшается или увеличивается нагрев в ядре точки под электродами
Уменьшается Увеличивается	Увеличивается Уменьшается	Увеличивается или уменьшается объем металла в зоне сварки, который необходимо нагревать до сварочной температуры, что нарушает стабильность процесса
Увеличивается Уменьшается	Не изменяется » »	Увеличивается или уменьшается нагрев в ядре точки и под электродами, соответственно изменяется теплоотвод в зону вокруг точки и в электроды
Уменьшается Увеличивается	Увеличивается Уменьшается	Уменьшение площади электродного контакта может обусловить выплески и перегрев металла в ядре точки, а также порчу рабочих концов электродов; увеличение этой же площади приводит к непроварам
Увеличивается (но в общем случае не до одинаковой величины)	Уменьшается	Увеличивается, но проявляется в различной степени нагрев деталей и рабочих концов электродов, что может обусловить брак по сварке и ее нестабильность, а также порчу электродов
Нарушается условие стабильности нагрева в зоне образования ядра сварной точки равных объемов металла до определенной температуры, а в ме-	Уменьшается или увеличивается	Могут происходить как перегрев металла в ядре точки вплоть до прожога, так и непровар, а также увеличение нагрева поверхностей деталей и рабочих частей электродов, что может приводить к браку по сварке и к ее нестабильности, а кроме того, вызывать порчу электродов

Причина нарушения	Изменение условия
Шунтирующие контакты Значительная крутизна переднего фронта кривой сварочного тока Большая инерционность механизма сжатия Образование на поверхностях электродов пленки оксидов и слоя нагара недопустимой величины Применение для изготовления рабочих частей электродов материалов с недостаточной электропроводностью, а также наличие в участках электрод—деталь больших переходных сопротивлений Увеличение собственного сопротивления сварочной машины Изменение толщины или сечения свариваемых деталей **	Некоторая часть сварочного тока ответвляется, что обуславливает соответствующее его уменьшение в зоне сварки Выделение тепловой энергии в участках деталь — деталь и электрод — деталь в начальной стадии нагрева в значительной мере увеличивается Нагретый в зоне сварки металл при переходе из пластического в жидкое состояние находится некоторое время при завышенном или заниженном усилии сжатия Контактные сопротивления электрод — деталь увеличиваются, а условия теплоотвода из зоны сварки в электроды ухудшаются Контактные сопротивления электрод — деталь увеличиваются, а условия теплоотвода из зоны сварки в электроды ухудшаются Уменьшается при прочих равных условиях сварочный ток, а значит, его плотность в зоне сварки Начальное собственное сопротивление деталей увеличивается уменьшается

* Имеет место при крутопадающей характеристике контактной машины; если же характе-

** При контактной микросварке изменения толщины (сечения) свариваемых металлов на сварки они могут быть и большими.

$Q_{a,c}$	$Q_{c,t}$	Характер изменений
стах контактирования электродов с деталями выделяется значительная, но не постоянная по своему значению тепловая энергия Уменьшается	Не изменяется	Уменьшается степень нагрева металла в зоне сварки
Не изменяется, но его доля в начале процесса сварки увеличивается	Не изменяется	В начальной стадии нагрева увеличиваются температурные градиенты между деталями и под электродами, что способствует образованию выплесков
Не изменяется	Не изменяется	Резкое изменение усилия сжатия способствует возникновению выплесков
Увеличивается *	Не изменяется	Увеличивается, но проявляется в различной степени нагрев деталей, что может в ряде случаев обусловить брак по сварке и нарушить ее стабильность
Увеличивается *	Не изменяется	Увеличивается нагрев поверхностей деталей и рабочих концов электродов, ухудшаются условия теплоотвода в электроды; это может затруднить разработку оптимальных режимов при сварке и требует принятия соответствующих мер (замены материала рабочих частей электродов, изменения способа и повышения тщательности подготовки поверхностей деталей под электродами и рабочих частей последних, увеличения усилия сжатия, подогрев деталей и др.)
Уменьшается	Не изменяется	Уменьшается нагрев в ядре точки и под электродами
Увеличивается * Уменьшается *	Увеличивается Уменьшается	Увеличивается или уменьшается нагрев в ядре точки

ристка машины жесткая, то изменения $Q_{a,c}$ в данном случае противоположны.

$\pm 10\%$ практически допустимы, однако следует учитывать, что иногда в реальных условиях

Поверхностная механическая обработка свариваемых деталей в зоне их соединения ультразвуковыми колебаниями позволяет стабилизировать переходные сопротивления $R_{длх}$, $R_{эл1х}$ и $R_{эл2х}$, а значит, и $R_{асх}$ [206, 275]. Однако следует учитывать, что при этом способе обработки поверхностей деталей наблюдается комплекс последовательных процессов: разрушение оксидных пленок и микровыступов, образование мостиков схватывания и разрушение последних с одновременным образованием оксидов [170, 206]. Поэтому на практике приходится выбирать такие технологические параметры ультразвуковой обработки, которые соответствуют той стадии действия ультразвука, при которой происходит лишь разрушение оксидных пленок и образование мостиков схватывания. В условиях полной или частичной сборки и сварки изделий радиоэлектроники и точного приборостроения одной монтажной-сварочной или при затрудненном доступе электродов в зону сварки выбор оптимальных технологических параметров ультразвуковой обработки деталей представляет значительные трудности.

Обычно преобразователи для ультразвуковой сварки имеют узкополосную частотную характеристику, поэтому получить стабильную величину амплитуды колебаний рабочего инструмента и, следовательно, стабильность значений сопротивлений $R_{длх}$, $R_{эл1х}$ и $R_{эл2х}$ возможно только при использовании генераторов с обратной электрической связью [207]. Однако область применения таких генераторов в крупносерийном производстве ограничена в связи с их сложностью и необходимостью высококвалифицированного обслуживания.

На основе изложенного можно заключить, что ни один из механических способов обработки поверхностей металлических деталей при точечной и рельефной конденсаторной микросварке применить в производственных условиях невозможно. Что же касается химических и термических способов подготовки поверхности деталей, позволяющих при сварке металлов толщиной более 0,8—1 мм уменьшить разброс значений $R_{длх}$, $2R_{элх}$ и $R_{асх}$, то при контактной микросварке они не обеспечивают получения малых значений и приемлемого уменьшения рассеяния контактных сопротивлений [44].

Общим выводом из проведенного анализа является предположение, что одним, а возможно, пока единственным из практически наиболее пригодных способов уменьшения и, по всей вероятности, рассеяния сопротивлений $R_{длх}$, $2R_{элх}$ и $R_{асх}$ при точечной и рельефной контактной, в том числе конденсаторной, микросварке может и должен являться предварительный подогрев деталей импульсом тока малой мощности и сглаживание переднего фронта импульса сварочного тока [27, 35, 41, 46, 60, 62, 83, 97, 143, 179, 189].

В процессе предварительного подогрева зоны микросварки деформируются микровыступы и разрушаются оксидные пленки, что приводит к уменьшению и стабилизации начальных (холодных) значений переходных сопротивлений. Благодаря этому снижается неустойчивость тепловыделения и уменьшается вероятность местного перегрева металла при сварке, приводящего к выплескам.

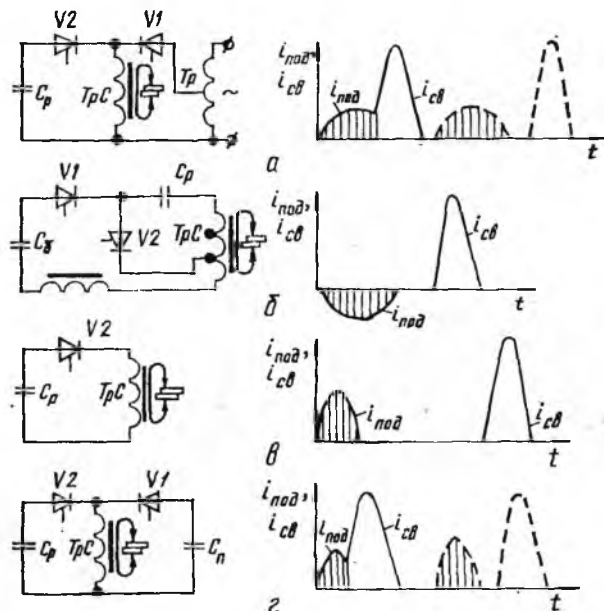


Рис. 36. Схемы, обеспечивающие предварительный подогрев зоны контактной сварки ($V1$, $V2$ — управляемые вентили).

При сглаживании переднего фронта импульса (кривой) сварочного тока плотность его в микровыступах в начале процесса значительно меньше критической [225], обуславливающей в области стягивания взрыв (вышлеск) определенного объема металла. В этом случае разрушение оксидных пленок и смятие микровыступов протекает дольше, чем при обычной (без сглаживания кривой тока) конденсаторной микросварке. Это обеспечивает более спокойное формирование сварного соединения и приводит к снижению рассеяния и абсолютного значения сопротивлений $R_{дл}$, $2R_{эд}$ и $R_{з,с}$ перед завершающей стадией процесса сварки.

Предварительный подогрев свариваемых деталей может выполняться (рис. 36, а) кратковременным включением с помощью вентилей $V1$ сварочного трансформатора TrC в цепь переменного тока [27, 46, 60, 179] через автотрансформатор Tr . Однако при этом невозможно получить простейшими средствами малые и стабильные по величине времена подогрева (менее 10 мс), так как возможные колебания угла зажигания игнитронов или тиристоров могут оказаться соизмеримыми со временем подогрева.

В схеме с подогревом деталей трансформированным зарядным током (рис. 36, б) рабочих конденсаторов C_p [60, 83, 179] буферные конденсаторы $C_с$ (их емкость во много раз больше C_p) через управляемый выпрямитель непрерывно подзаряжаются до заданного уровня напряжения. Схема работает поочередно в режиме зарядки (подо-

грев) емкости C_p (через $V1$) и ее разряда через $V2$ на трансформатор TrC (сварка). Поскольку при $C_6 \gg C_p$ процессы зарядки и разряда описываются одинаковыми уравнениями, то форма и амплитудные значения подогревного $i_{под}$ и сварочного $i_{св}$ токов также одинаковы [179]. Для независимой регулировки амплитуды токов $i_{под}$ и $i_{св}$ необходимо обеспечивать раздельное регулирование коэффициента трансформации при подогреве и сварке. Однако при полной или частичной сборке изделий одной монтажными-сварщиками это не позволяет простыми средствами осуществлять быстрое переключение режимов подогрев—сварка. Кроме того, подогрев зоны микросварки зарядным током конденсаторов в ряде случаев неэффективен в связи с невозможностью раздельной регулировки накопленной энергии для подогрева и сварки. Если в этой схеме нет буферной емкости C_6 (см. рис. 36, б), то появляются и другие недостатки: отсутствие независимой регулировки времени протекания и амплитуды тока подогрева и зависимость амплитуды первого подогревного импульса тока от момента включения зарядного тиристора $V1$ относительно полуволны синусоиды переменного тока. При большой амплитуде первого импульса в зоне микросварки возникают выплески.

Предварительный подогрев зоны сварки может также осуществляться за счет разряда на сварочный трансформатор TrC рабочих C_p (рис. 36, в) [128, 188, 190—193, 219] или подогревных C_n (рис. 36, г) конденсаторов [41, 137, 179], заряженных до меньшего уровня напряжения, чем при сварке. Обе схемы отличаются простотой, обеспечивают стабильность и независимую регулировку параметров подогревного $i_{под}$ и сварочного $i_{св}$ импульсов тока. Однако более универсальной и перспективной является схема (рис. 36, г), обеспечивающая различные термические циклы подогрев — сварка (как с наложением друг на друга импульсов токов подогрева и сварки, так и регулируемой в широких пределах паузой между ними).

Широкими технологическими возможностями отличаются схемы, обеспечивающие подогрев деталей несколькими (не менее 3—5) возрастающими по амплитуде импульсами разрядного тока конденсаторов при повышенной (300—800 Гц) частоте следования этих импульсов [76]. Однако область применения в крупносерийном производстве таких схем пока ограничена в связи с их сложностью и необходимостью высококвалифицированного обслуживания.

Требуемую по технологическим соображениям форму кривой сварочного тока со сглаженным передним фронтом можно получить различными способами:

принудительным гашением управляемого вентиля $V1$ (рис. 37, а) за счет разряда предварительно заряженного конденсатора C_p через вентиль $V2$ на сварочный трансформатор TrC [178, 179];

цепочным включением (рис. 37, б) ряда емкостей C_{p1}, C_{p2}, C_{p3} и индуктивностей L [179];

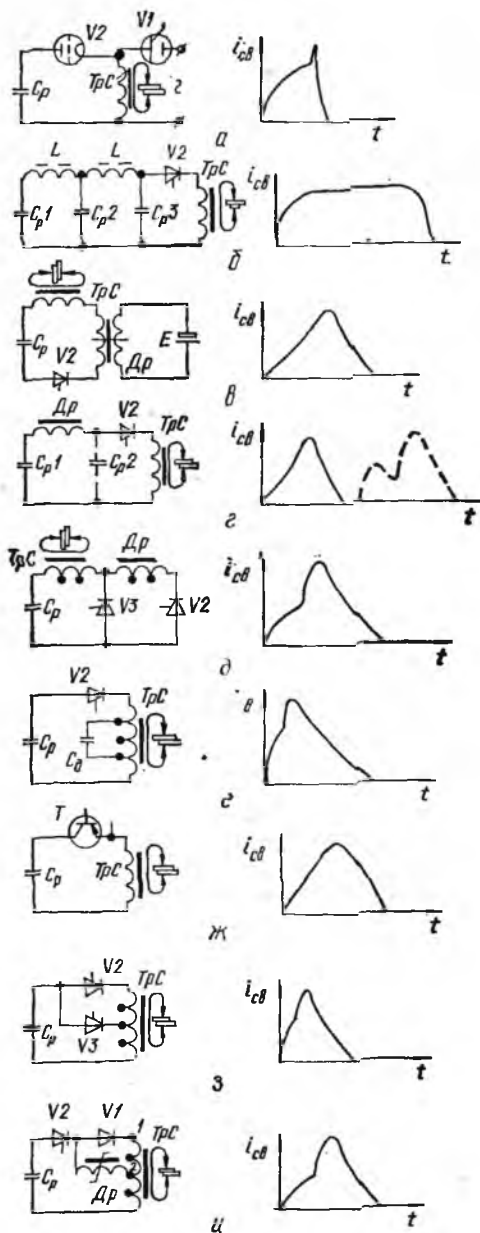
включением в разрядную цепь дросселя Dr , в том числе и с подмагничиванием (рис. 37, в). В начале прохождения тока сердечник дросселя не насыщен, скорость нарастания тока $i_{св}$ невелика. После насыщения сердечника влияние дросселя на переходной

Рис. 37. Схемы, обеспечивающие сглаживание переднего фронта импульса сварочного тока.

процесс становится небольшим [179];

включением в силовую цепь двух батарей конденсаторов C_{p1} и C_{p2} (рис. 37, г), заряжаемых до одного уровня напряжения и разделенных дросселем $Др$ [137]. Вначале на сварочный трансформатор $ТрС$ разряжается малая батарея конденсаторов C_{p2} , а после насыщения дросселя $Др$ — основная батарея C_{p1} . При такой схеме во вторичной цепи сварочной машины индуцируется двухступенчатый импульс тока $i_{св}$. Управление формой этого импульса осуществляется изменением емкостей C_{p1} и C_{p2} , а также индуктивности дросселя;

включением в разрядную цепь машины [169] двух управляемых вентилях, разделенных дросселем $Др$ (рис. 37, д). При подаче команды на сварку вначале включается вентиль $V2$ и заряженная батарея конденсаторов C_p начинает разряжаться на первичную обмотку сварочного трансформатора $ТрС$ и дроссель $Др$. Через определенное время (выбираемое в соответствии с технологическими требованиями) блок управления сваркой включает вентиль $V3$, разрядный ток начинает протекать только через первичную обмотку трансформатора $ТрС$. Во вторичной цепи этого трансформатора индуцируется ток $i_{св}$ сложной формы, причем форма и длительность переднего фронта при всех прочих равных условиях зависит от индуктивности дросселя и сварочного трансформатора и времени подачи управляющего импульса на вентиль $V3$;



за счет дополнительной батареи конденсаторов C_d [189]. При включении разрядного вентиля $V2$ (рис. 37, *е*) предварительно заряженная батарея конденсаторов C_p разряжается на сварочный трансформатор TrC , а дополнительная батарея C_d заряжается. Это изменяет характер переходных процессов при разряде батареи C_p , и во вторичной обмотке трансформатора TrC индуцируется ток $i_{св}$ сложной формы;

включением в разрядную цепь конденсаторной машины триода T (рис. 37, *ж*), управляемого от задающего генератора [179];

включением в разрядную цепь двух управляемых вентилях $V2$ и $V3$, подключенных к различным отводам первичной обмотки трансформатора TrC , причем вентиль $V3$ (рис. 37, *з*) соединяется с меньшим числом витков [100]. Эта схема работает так же, как и схема, представленная на рис. 37, *д*, однако в ней (рис. 37, *з*) вентиль $V3$ шунтирует не дроссель, а часть обмотки сварочного трансформатора TrC ;

включением в разрядную цепь машины (рис. 37, *и*) неуправляемого вентиля $V1$ и насыщающегося дросселя Dr [190], которые образуют две параллельные ветви, подключенные к различным отводам первичной обмотки сварочного трансформатора, причем дроссель Dr подключен к меньшему числу витков. При включении вентиля $V2$ предварительно заряженная батарея конденсаторов C_p начинает разряжаться на сварочный трансформатор через вентиль $V1$. В начальный момент времени ток не проходит по ветви дросселя, так как дроссель находится в ненасыщенном состоянии и представляет собой большое реактивное сопротивление. Через определенное время, равное времени насыщения дросселя, его сопротивление резко падает, он приходит в состояние проводимости, разрядный ток начинает протекать по цепи с дросселем. Вентиль $V1$ при этом заперт положительным потенциалом, который прикладывается к катоду вентиля вследствие ЭДС на концах 1, 2 обмотки трансформатора TrC при прохождении разрядного тока по цепи с дросселем. При этом во вторичной обмотке TrC индуцируется ток $i_{св}$ сложной формы. Форма и длительность переднего фронта сварочного тока $i_{св}$ зависит от индуктивности трансформатора TrC и числа витков дросселя, включенных последовательно с неуправляемым вентиляем.

Анализ рассмотренных схем позволяет сделать следующие выводы. Схема, приведенная на рис. 37, *а*, имеет ограниченные возможности регулирования длительности завершающей части импульса сварочного тока. Кроме того, при гашении инвертора могут возникнуть перенапряжения, которые нарушают ее нормальную работу. Схема, показанная на рис. 37, *б*, не позволяет простыми средствами осуществлять быстрое переключение режима сварки. Из схем, в которых используются дроссель (рис. 37, *в—д* и 37, *и*) или переключение коэффициента трансформации сварочного трансформатора (рис. 37, *з*), наиболее простой является схема, приведенная на рис. 37, *и*. Она содержит меньше элементов и не требует специально синхронизирующего блока, обеспечивающего включение вентиля $V3$ (см. рис. 37, *д*, *з*) в определенный момент времени относительно

начала прохождения импульса сварочного тока. Схема, приведенная на рис. 37, *е*, даже при равенстве C_d и C_p не позволяет получить существенного сглаживания переднего фронта импульса сварочного тока. Схема, которая показана на рис. 37, *ж*, в настоящее время не может найти широкого промышленного применения, так как полупроводниковые триоды пока не позволяют коммутировать значительные мощности.

Таким образом, на основании анализа схем (рис. 36 и 37) можно заключить, что наибольший интерес для практического использования представляют схемы, обеспечивающие предварительный подогрев (рис. 36, *е*, *г*) и сглаживание переднего фронта импульса сварочного тока (рис. 37, *з*, *и*). Однако до настоящего времени в литературе отсутствуют результаты исследований стабильности сопротивлений $r_{дл}$, $2r_{эд}$ и $r_{эс}$ в процессе нагрева (при использовании схем со сглаженным передним фронтом импульса сварочного тока и с наложением импульса сварочного тока на импульс тока подогрева) и охлаждения (при использовании схем с регулируемой паузой между импульсами подогрева и сварки) зоны точечной контактной сварки.

Влияние подогрева на стабильность контактных сопротивлений зоны сварки. Исследование влияния процесса подогрева на стабильность контактных и общего сопротивлений зоны точечной контактной микросварки [43] при малых F_s (10—50 Н) проводилось на лабораторной установке, электрическая схема которой содержит два источника питания для точечной конденсаторной сварки, блок импульсов задержки (БИЗ) ¹ и датчик тока (плоский шунт) [183]. Источник питания с батареей конденсаторов C_n использовался для подогрева деталей в зоне сварки, а источник питания с батареей C_n — для подачи в зону сварки через фиксированные промежутки времени после подогрева деталей до пяти измерительных импульсов малой амплитуды и длительности. Это позволило (с помощью вольт-амперных характеристик [126]) измерять контактные сопротивления зоны сварки как в процессе, так и после прохождения импульса тока подогрева.

Измерение начальных и конечных значений сопротивлений зоны сварки осуществлялось микроомметром М-246. Для определения при подогреве контактных $r_{дл}$, $2r_{эд}$ и общего $r_{эс}$ сопротивлений снимались вольт-амперные характеристики [126].

Изменение величины сопротивлений $r_{длпод}$, $2r_{эдпод}$ при подогреве зависит от многих факторов: начального сопротивления, толщины и свойств оксидной пленки, твердости материалов и т. д. Поэтому влияние тока подогрева $i_{под}$ и усилия F_s на контактные сопротивления зоны сварки исследовалось статистическими методами [94].

В качестве репрезентативной выборки каждого сочетания материалов при фиксированных установочных электрических параметрах режима подогрева и усилия F_s были приняты партии по 45 образцов.

¹ Блок БИЗ представляет собой пять соединенных последовательно ждущих мультивибраторов, выходные импульсы с которых подаются на импульсный трансформатор, а с него — на разрядный тиристор.

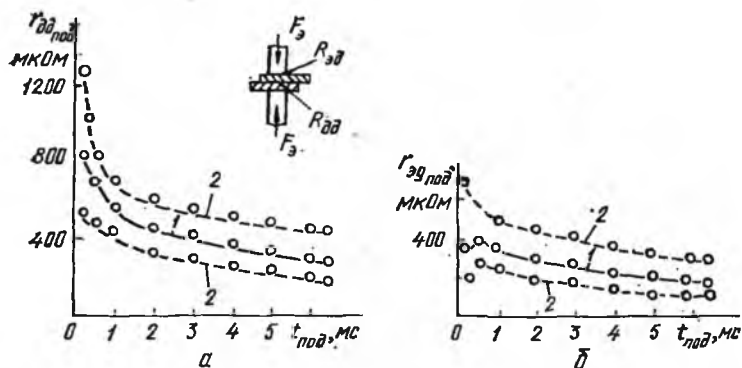


Рис. 38. Динамика изменения медианного значения (1) сопротивлений $r_{дд}$ (а) и $r_{эд}$ (б) в процессе подогрева никеля НП2, $\delta = 0,1 + 0,1$ мм и их 95%-ные доверительные интервалы (2) рассеяния.

Последние выбирались таким образом, чтобы начальные сопротивления зоны сварки перед прохождением тока подогрева имели логарифмически нормальное распределение с параметрами, полученными выше (см. рис. 26). В процессе прохождения импульса $i_{под}$ величина сопротивлений $r_{дд_{под}}$, $2r_{эд_{под}}$ и $r_{в.с_{под}}$ определялась через каждые 0,2 мс (использовался отметчик времени осциллографа), а затем через фиксированные промежутки времени 5—10 мс.

При исследовании влияния подогрева на стабильность контактных сопротивлений зоны сварки была принята гипотеза о логарифмически нормальном распределении рассеяния сопротивлений относительно среднего текущего значения в каждый момент времени. Специальная проверка по критерию Пирсона [224] показала, что ре-

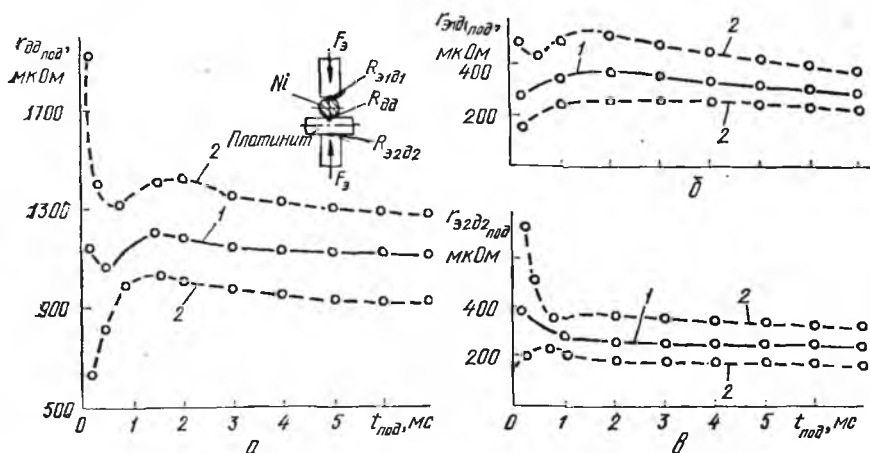


Рис. 39. Динамика изменения медианного значения (1) сопротивлений $r_{дд_{под}}$ (а), $r_{эд1д1}$ (б) и $r_{э2д2}$ (в) в процессе подогрева проволоки из никеля НП2, $d = 0,4$ мм с платинитом, $d = 0,4$ мм и их 95%-ные доверительные интервалы (2) рассеяния.

зультаты наблюдений согласуются с данной гипотезой на уровне $p = 0,95$.

Экспериментальные исследования проводились в диапазоне усилий $F_s = 10 \div 50$ Н. На рис. 38 и 39 приведена динамика изменения медианного значения¹ и 95 %-ные доверительные интервалы рассеяния сопротивлений $r_{длпод}$, $r_{адпод}$, $r_{ас2под}$ в процессе подогрева и охлаждения некоторых сочетаний материалов. Анализ этих результатов показывает, что введение предварительного подогрева зоны сварки позволяет снизить величину и рассеяние контактных сопротивлений. При подогреве листовых материалов ($F_s = 20$ Н, $d_s = 1$ мм) медианные значения сопротивлений $r_{длпод}$ и $r_{адпод}$ (см. рис. 38, где $I_{под} = 680$ А) незначительно отличаются друг от друга, а для проволок (крестообразное соединение) $r_{длпод}$ существенно выше $r_{адпод}$ (см. рис. 39, где $I_{под} = 420$ А). Это объясняется тем, что теоретически в крестообразном соединении контактирование проволоки с электродом осуществляется по линии, а проволоки с проволокой — в точке.

Однако в целом измерение контактных сопротивлений в процессе подогрева зоны сварки весьма затруднительно и проще измерять общее сопротивление этой зоны $r_{аспод}$ (рис. 40). Это тем более приемлемо, что рассеяние сопротивлений $r_{длпод}$, $r_{адпод}$ и $r_{аспод}$ быстро падает — примерно через 1,5—2,0 мс для листовых материалов и через 2—3 мс для проволок. Медианные значения сопротивлений достигают установившегося (минимального) значения через 20—25 мс для листовых материалов и через 30—35 мс для проволок.

С увеличением тока подогрева $I_{под}$ медианные значения и рассеяние сопротивлений зоны сварки снижаются. Увеличение усилия сжатия электродов F_s от 10 до 50 Н при фиксированных установочных параметрах режима подогрева незначительно снижает медианные значения и рассеяние сопротивлений зоны сварки.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что при точечной и рельефно-точечной конденсаторной микросварке подогрев свариваемых деталей трансформированным разрядным током конденсаторов позволяет снизить величину контактных сопротивлений и получить их 95 %-ные доверительные интервалы рассеяния для исследованных материалов в пределах ± 10 % медианного значения через 2—3 мс после начала прохождения $i_{под}$, в то время как рассеяние исходных сопротивлений в 1,5—4 раза больше или меньше этого значения. Вместе с контактными сопротивлениями стабилизируется и общее сопротивление зоны сварки.

1) Такие высокие результаты по стабилизации сопротивлений зоны точечной контактной микросварки получены при соотношении амплитудных значений токов подогрева и сварки в пределах 0,3—0,8. Повышение верхнего предела этого соотношения является недопу-

¹ Вероятность события, что случайная величина окажется выше или ниже медианного значения, одинакова и равна 0,5.

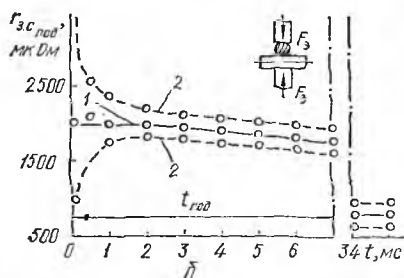
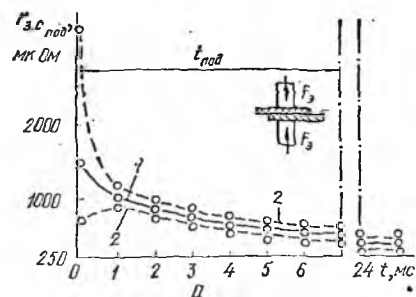
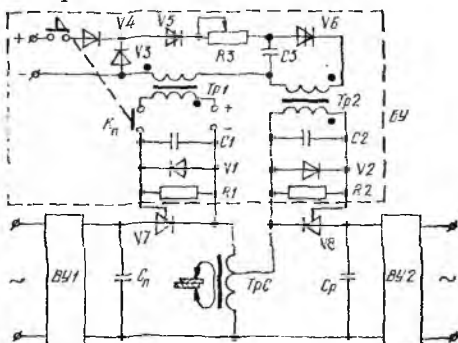


Рис. 40. Динамика изменения динамического значения (I) сопротивления $r_{з.с. под}$ в процессе подогрева и его 95 %-ные доверительные интервалы рассеяния (2): а — никель НП2, $\delta = 0,1 + 0,1$ мм ($I_{под} = 680$ А, $F_3 = 20$ Н, $d_3 = 1$ мм); б — никель НП2, $d = 0,4$ мм и платинит, $d = 0,4$ мм ($I_{под} = 420$ А, $F_3 = 20$ Н, $d_3 = 1,0$ мм).

Рис. 41. Электрическая схема установки для точечной конденсаторной микросварки с регулируемыми циклами подогрев — сварка и подогрев — пауза — сварка.



стимым, ввиду того что при токе $I_{под}$, близком к $I_{св}$ в контактах зоны микросварки происходит интенсивное тепловыделение и образуются выплески.

Влияние отклонений сопротивлений на процесс и качество соединений при комбинированных циклах подогрев — сварка и подогрев — пауза — сварка. Рассеяние сопротивлений зоны микросварки быстро падает после подачи импульса тока подогрева и достигает практически установившегося значения в среднем через 2—3 мс. С точки зрения стабилизации сопротивлений зоны микросварки включение сварочного тока может осуществляться как в процессе, так и после прохождения импульса подогревного тока. Однако в случае неполного остывания деталей после подогрева при прохождении импульса сварочного тока возможна некоторая нестабильность температурного поля, вызванная значительным рассеянием начальных контактных сопротивлений. Вследствие этого можно предположить появление при сварке деталей недопустимых дефектов (выплесков, прожогов, значительной деформации деталей в месте соединения).

При проведении данных исследований для конкретных материалов с определенными параметрами их качества (шероховатость, диаметр или толщина, микротвердость, химический состав) выбирался оптимальный режим конденсаторной микросварки с комбинированными циклами нагрева (подогрев — сварка и подогрев — пауза — сварка). После этого при фиксированной величине сопротивления $R_{з.с.х}$ выполнялась сварка необходимого количества

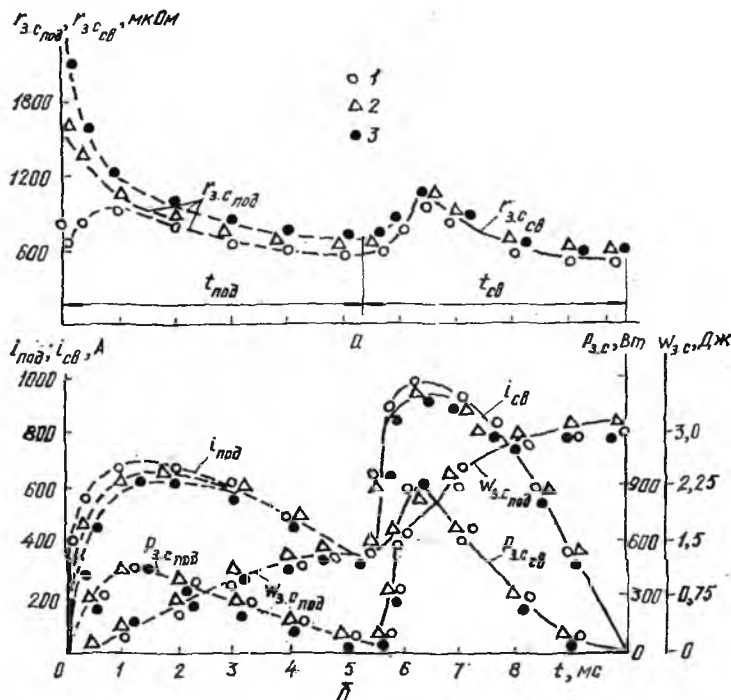


Рис. 42. Зависимость сопротивлений $r_{z.c.под}$ и $r_{z.c.св}$ (а), токов $i_{под}$ и $i_{св}$, мощностей $p_{z.c.под}$ и $p_{z.c.св}$, энергий $w_{z.c.под}$ и $w_{z.c.св}$ (б) от времени сварки $t_{св}$ при точечной микросварке никеля НП2, $\delta = 0,1 + 0,1$ мм ($F_0 = 20$ Н, $d_0 = 1$ мм):

1 — $R_{з.с.х} = 140$ мкОм; 2 — $R_{з.с.х} = 1500$ мкОм; 3 — $R_{з.с.х} = 3200$ мкОм.

образцов (не менее 100 шт.). Затем сопротивление $R_{з.с.х}$ изменялось и производилась сварка следующей партии образцов (при всех прочих равных условиях).

Электрическая схема установки для точечной конденсаторной микросварки с регулируемыми циклами подогрев — сварка и подогрев — пауза — сварка, на которой проводились эти исследования, показана на рис. 41. Она содержит выпрямительные устройства ВУ1 и ВУ2, подогревную $C_п$ и рабочую $C_р$ батареи конденсаторов, разрядные тиристоры V7 и V8, сварочный трансформатор TrC и блок управления БУ. В блок управления входят импульсные трансформаторы Tr1 и Tr2, цепочки, состоящие из конденсатора, диода и резистора ($C1, V1, R1$ и $C2, V2, R2$ — для защиты тиристоров от помех), диоды V3 и V4, динисторы V5 и V6, конденсатор C3, резистор R3 и кнопка пуска $K_п$. Схема работает следующим образом. При достижении заданного усилия сжатия замыкаются контакты кнопки $K_п$, включается тиристор V7 и предварительно заряженная батарея конденсаторов $C_п$ начинает разряжаться на сварочный трансформа-

тор TrC . Одновременно с этим трансформированный импульс тока (трансформатор $Tr1$) включает динистор $V5$, от источника постоянного тока через резистор $R3$ начинается зарядка конденсатора $C3$. Когда напряжение на конденсаторе $C3$ достигает определенного уровня, включается динистор $V6$, конденсатор $C3$ разряжается на трансформатор $Tr2$, включается тиристор $V8$ и конденсаторы C_p разряжаются на сварочный трансформатор TrC . Время подачи на управляющую цепь тиристора $V8$ напряжения $U_{зд}$ импульса задержки регулируется резистором $R3$. За счет этой регулировки данная схема обеспечивает получение термических циклов подогрев — сварка и подогрев — пауза — сварка с наложением на импульс тока подогрева импульса сварочного тока и регулировку паузы между этими импульсами.

На рис. 42 и 43 приведены зависимости $r_{з.с.под} = f(t_{под})$, $r_{з.с.св} = f(t_{св})$, $i_{под} = f(t_{под})$, $i_{св} = f(t_{св})$, $p_{з.с.под} = f(t_{под})$, $p_{з.с.св} = f(t_{св})$, $w_{з.с.под} = f(t_{под})$, $w_{з.с.св} = f(t_{св})$ исследованных соединений, полученные при конденсаторной микросварке с комбинированными циклами нагрева. Их анализ показывает, что при $R_{з.с.х} = var$ использование комбинированных циклов подогрев — сварка и подогрев — пауза — сварка позволяет устранить значительное рассеяние и уменьшить значения как $R_{дл.х}$ и $2R_{зд.х}$, так и $R_{з.с.х}$, а также уменьшить и стабилизировать в начале процесса падение напряжения в зоне микросварки (это исключает появление выплесков металла, обусловленных повышенными скоростями ввода энергии в зону микросварки); стабилизировать и увеличить по сравнению с простым циклом нагрева интервал времени от начала импульса тока до наступления на кривых $r_{з.с.св}$, $p_{з.с.св}$ и $w_{з.с.св}$ максимальных значений, а также стабилизировать величину последних (что способствует более плавному развитию и стабилизации всего сварочного процесса); устранить в процессе сварки нестабильность $p_{з.с.св}$ и $w_{з.с.св}$ в различные моменты нагрева¹.

Металлографический анализ точечных микросварных соединений, полученных при $R_{з.с.х} = var$ на комбинированных циклах нагрева, показал, что качество соединений высокое, в зоне соединения отсутствуют поры, раковины, трещины и другие несплошности. При сварке листовых материалов параметры (высота и диаметр) ядер сварных токов практически не отличаются друг от друга. При сварке проволоки увеличение $R_{з.с.х}$ не влияет на деформацию зоны соединения.

Коэффициенты надежности точечных и рельефно-точечных микросварных соединений, полученных при комбинированных циклах (табл. 9), выше, чем при точечной конденсаторной микросварке с простым циклом нагрева.

¹ Незначительное рассеяние при $R_{з.с.х} = var$ амплитудных значений $i_{под}$ и $i_{св}$ (при стабильных установочных параметрах режима подогрева и сварки) объясняется саморегулированием процесса конденсаторной микросварки,

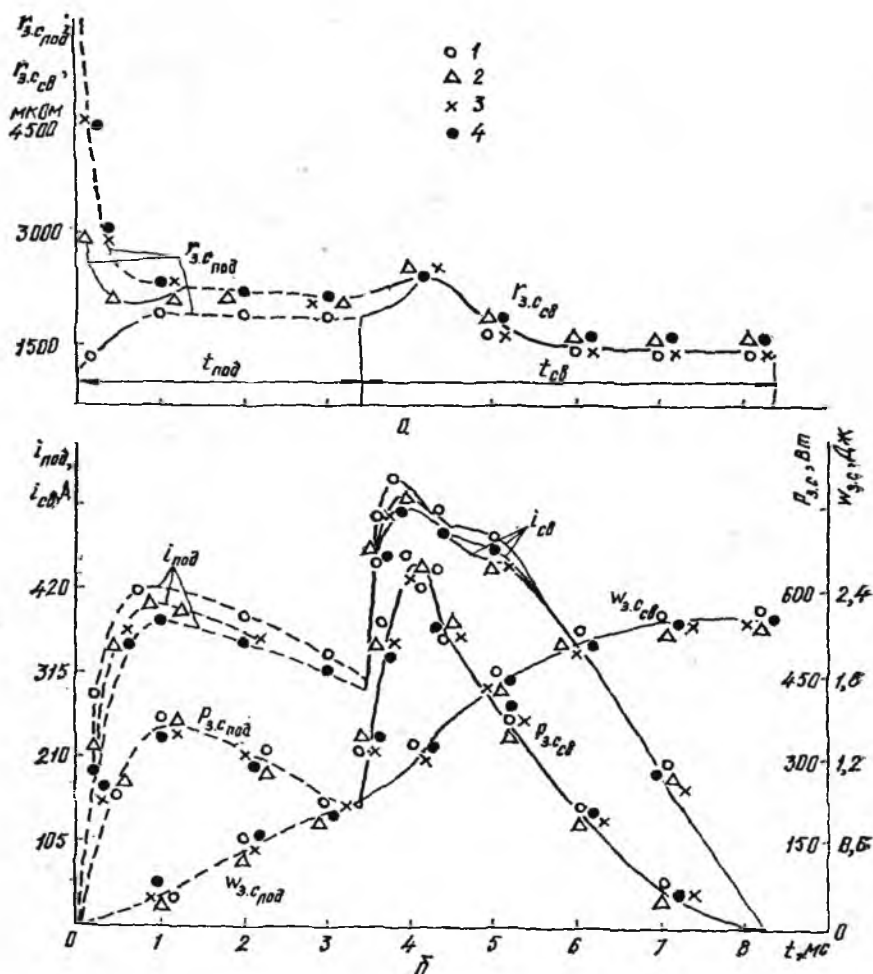


Рис. 43. Зависимость сопротивлений $R_{з.с.под}$ и $R_{з.с.св}$ (а), токов $i_{под}$ и $i_{св}$, мощностей $P_{з.с.под}$ и $P_{з.с.св}$, энергий $w_{з.с.под}$ и $w_{з.с.св}$ (б) от времени сварки $t_{св}$ при рельефно-точечной микросварке платинита, $d = 0,4$ мм ($F_s = 20$ Н, контактная поверхность электрода 1×1 мм):
 1 — $R_{з.с.х} = 1200$ мкОм, 2 — $R_{з.с.х} = 3000$ мкОм, 3 — $R_{з.с.х} = 9200$, 4 — $R_{з.с.х} = 14500$ мкОм.

Аналогичные результаты были получены при сварке других материалов, широко применяемых в радиоэлектронике и точном приборостроении.

На основании проведенных исследований можно сделать вывод, что использование указанных выше комбинированных циклов нагрева при конденсаторной микросварке позволяет стабилизировать и уменьшить контактные сопротивления и при прочих равных условиях, следовательно, получать бездефектные микросварные соединения

Таблица 9. Значения коэффициентов надежности микросварных соединений при комбинированных циклах нагрева

Материал, толщина (диаметр)	Испытуемые образцы	$R_{в.с.х'}$ ммОМ	$\bar{F}_{po}$ $\bar{F}_{p, H}$	S, H	$\bar{Y}$	Y_{γ} (=)	Y_{γ} (≠)
С наложением импульсов подогревного и сварочного токов							
Никель НП2, $\delta = 0,1 + 0,1$ мм	Из основного ме- талла	—	46,33	1,82	—	—	—
	Сварные	740	44,71	2,07	0,965	0,950	0,811
		1550	44,47	2,03	0,959	0,946	0,808
		3300	44,19	2,09	0,953	0,936	0,800
Никель НП2, $d = 0,4$ мм + + платинит $d = 0,4$ мм	Из основного ме- талла (платини- та)	—	61,44	1,44	—	—	—
	Сварные	1000	59,55	2,03	0,974	0,952	0,866
		3000	58,77	2,21	0,961	0,932	0,848
		9600	58,71	2,26	0,960	0,930	0,846
		12 000	58,57	2,33	0,957	0,925	0,841
С нулевой паузой между импульсами токов подогрева и сварки							
Никель НП2, $\delta = 0,1 + 0,1$ мм	Сварные	740	44,38	2,17	0,957	0,937	0,800
		1550	43,66	2,13	0,942	0,923	0,788
		3300	43,38	2,10	0,936	0,917	0,783
Никель НП2, $d = 0,4$ мм + + платинит $d = 0,4$ мм	»	1000	59,57	2,10	0,974	0,950	0,864
		3000	59,33	2,01	0,970	0,949	0,863
		9600	59,09	2,01	0,966	0,945	0,860
		12 000	59,47	2,67	0,972	0,929	0,845
С паузой между импульсами токов подогрева и сварки							
Никель НП2, $\delta = 0,1 + 0,1$ мм	Сварные	740	44,14	2,02	0,952	0,939	0,802
		1550	43,47	2,15	0,936	0,917	0,783
		3300	43,38	2,19	0,936	0,913	0,779
Никель НП2, $d = 0,4$ мм + + платинит $d = 0,4$ мм	»	1000	59,80	1,85	0,978	0,962	0,875
		3000	59,71	1,83	0,976	0,962	0,875
		9600	59,85	2,02	0,978	0,965	0,877
		12 000	59,71	1,83	0,976	0,962	0,875

с высокими показателями надежности. Применительно к неразъемным соединениям узлов прецизионных изделий радиоэлектроники и точного приборостроения установлено, что благодаря циклам подогрев — сварка и подогрев — пауза — сварка изменение контактных сопротивлений при всех прочих равных условиях не вызывает появления выплесков, усадочных раковин и значительной деформации микросварных соединений.

ГЛАВА IV

СВАРИВАЕМОСТЬ РАЗЛИЧНЫХ МЕТАЛЛОВ ПРИ ТОЧЕЧНОЙ И РЕЛЬЕФНОЙ КОНДЕНСАТОРНОЙ СВАРКЕ

1. Особенности свариваемости и методика исследований

По своей физической природе все способы контактной, а следовательно, и конденсаторной сварки сопротивлением являются сложными металлургическими процессами [52, 175].

При точечной и рельефной конденсаторной сварке сопротивлением между двумя соединяемыми металлами возникают внутрикристаллические формы связи, которые получаются в результате: 1) расплавления свариваемых металлов (жидкий металл при нагреве находится в замкнутом объеме [52, 175] и охватывает в основном оба металла), что соответствует их сварке в жидком состоянии; 2) разрушения в процессе нагрева металлов оксидных пленок и обеспечения физического контакта соединяемых металлических поверхностей с созданием на них центров с повышенной активностью атомов, что приводит к взаимодействию поверхностных слоев металлов и образованию между ними надежных металлических связей, т. е. к сварке в твердом состоянии.

Некоторой особенностью характеризуется образование рельефно-точечных сварных соединений с так называемой открытой зоной плавления [95, 162, 209]. Здесь при нагреве происходит расплавление металлов в зоне их контактирования, причем под действием усилия сжатия жидкий металл полностью (реже частично, когда это усилие мало) удаляется из зоны нагрева. При полном выдавливании расплавленного металла формирование соединения осуществляется в твердом состоянии, а при частичном его удалении соединение происходит в жидком состоянии.

Однако в отличие от дуговой, электрошлаковой и других способов сварки плавлением [195], как и при некоторых разновидностях контактной сварки, процессы образования точечных и рельефных соединений при конденсаторной сварке имеют следующие специфические особенности: высокие и очень значительные средние скорости нарастания температур в зоне сварки в процессе ее нагрева током $I_{св}$, которые нередко могут достигать многих сотен тысяч градусов в секунду (в первую очередь при бестрансформаторной конденсаторной сварке сопротивлением); большие пластические деформации нагретого металла в зоне сварки (обычно благодаря значительным усилиям сжатия электродов); весьма интенсивное охлаждение зоны

сварки за счет теплоотвода в электроды контактной машины (обычно из меди и ее высокотеплопроводных сплавов).

Высокая интенсивность нагрева зоны сварки, наличие сжатия металла, очень малая продолжительность нагрева (тысячные и как максимум одна-две десятые доли секунды) и высокие скорости охлаждения обуславливают некоторые особенности процесса образования при конденсаторной сварке точечных и рельефных соединений¹ и структурных превращений в них. Эти особенности и превращения изучены еще недостаточно, что в первую очередь относится к исследованию структурных превращений при больших скоростях нагрева и охлаждения в верхнем и нижнем критических интервалах температур [142, 163].

Наиболее полные исследования по свариваемости и металлографическому анализу различных металлов при точечной и рельефной конденсаторной сварке проведены применительно к металлам малых толщин и сечений [132, 142] в ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР.

Необходимо, однако, отметить, что эти исследования, основная часть которых изложена ниже, проводились в первую очередь для решения технологических задач, а не для детального исследования металлургических особенностей точечной и рельефной конденсаторной микросварки различных металлов и сплавов.

В процессе данных исследований в первую очередь разрабатывались такие режимы сварки конкретных образцов металлов, при которых получалась возможно большая прочность сварных соединений.

Целью металлографических исследований являлось определение состояния (жидкое или твердое), в котором осуществлена сварка данных металлов; расположения, формы и размеров ядра (или участка максимального нагрева); ширины зоны термического влияния и структуры металла в зоне соединения; наличия, расположения и размеров различных дефектов (трещины, раковины, поры, подрезы, неметаллические включения и др.).

При проведении опытов по свариваемости образцы подвергались механическим испытаниям, а несколько передавалось на металлографические исследования.

Из сварных образцов, зажатых в специальные зажимы-оправки или залитых в пластмассу (протакрил, этакрил, эпоксидную смолу и др.), изготовлялись шлифы. По химическому составу материал для зажимов должен быть близок к свариваемому, чтобы при шлифовке и полировке шлифа обеспечить равномерный износ сварного образца и материала зажима, а при травлении — облегчить выявление микроструктуры. При установке в зажим-оправку или заливке в пластмассу сварные образцы закреплялись так, чтобы торец зажима-оправки или оправки из пластмассы был ниже центра сварных точек на 0,1—0,15 мм.

Следует отметить, что существующие методики изготовления микрошлифов вносят элемент субъективности при оценке качества микро-

¹ При рельефно-точечной конденсаторной сварке практически образуются такие же соединения, как и при «чистой» точечной сварке этим способом (т. е. как с литым ядром, так и без него).

сварного соединения, так как при малых размерах зоны сварки нет гарантии, что исследуется требуемая плоскость этой зоны. Кроме того, нахождение зоны сварки достигалось многократным повторением шлифовки и травления, а часто и изготовлением нового микрошлифа. Все это в значительной мере сдерживало широкое применение металлографического анализа для выборочного контроля качества микросварных соединений в условиях серийного производства.

Разработанная в ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР новая методика изготовления микрошлифов [38], позволяет устранить эти трудности и заключается в следующем. На сварном узле 1 (рис. 44, а) под микроскопом (типа МБС) фиксируют специальную вставку-свидетель 2 из металла или пластмассы. Торец этой вставки, являющийся контрольной поверхностью, располагают в необходимой для исследования плоскости 4, секущей сварную точку 3. Для крепления вставки-свидетеля на сварной узел можно использовать клей или эпоксидные смолы, а в случае металлической вставки — и сварку (точечную конденсаторную ручным монтажным инструментом [137, 142] или импульсную лазерную). Материал вставки-свидетеля выбирается в каждом конкретном случае. Цветной пластик, например, должен контрастировать по цвету и не растворяться в заливочной пластмассе. Материал металлической вставки должен быть близок к исследуемому материалу по физико-механическим свойствам и менее активен по химическому взаимодействию с реактивами для выявления структуры.

Если сварной узел в зоне соединения имеет сложную форму и на нем трудно закрепить вставку-свидетель, можно использовать другую методику. Сварной узел 1 (рис. 44, б) и вставку-свидетель 2 помещают в вязкую основу — пластилин или парафин (на рисунке не показаны) — на некотором расстоянии друг от друга. Затем под микроскопом располагают вставку-свидетель таким образом, чтобы ее контрольная поверхность лежала в необходимой для исследования плоскости 4, секущей сварную точку 3. После указанных выше операций сварной образец 1 со вставкой-свидетелем 2 заливают в оправке 6 пластмассой 5 (рис. 44, в, д) и подвергают шлифовке (предварительно удалив после затвердевания пластмассы оправку 6) до требуемой плоскости сечения 4 зоны сварки 3 (рис. 44, г, е). Образцы

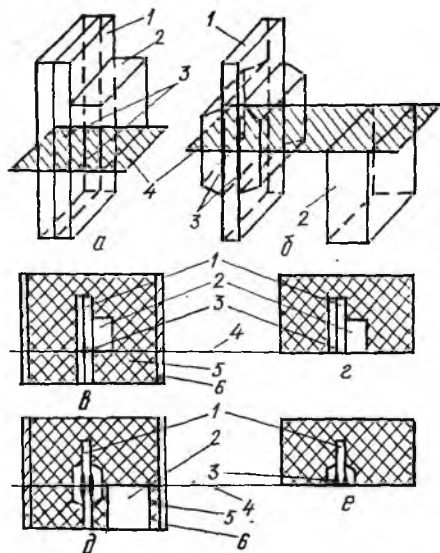


Рис. 44. Схема изготовления шлифов микросварных соединений.

Таблица 10. Режимы травления шлифов

Свариваемый металл	Состав реактива и режим химического (ХТ) или электролитического (ЭТ) травления	Примечание
Медь и ее сплавы	Уксусная кислота — 100 мл, перекись водорода 0,5 мл, вода — 100 мл; ХТ — погружением в реактив Хлористое железо — 10 г, соляная кислота — 25 мл, вода — 100 мл; ХТ — протирка ватным тампоном, смоченным в реактиве	Перекись водорода добавлять перед травлением
	10—20 %-ный водный раствор хромовой кислоты — 100 мл, перекиси водорода — несколько капель; ХТ — погружением в реактив или протирка ватным тампоном, смоченным в реактиве	
	10—20 %-ный водный раствор надсернистого аммония — 100 мл, нашатырного спирта или аммиака — 10—20 капель; ХТ — погружением в реактив	Нашатырный спирт или аммиак добавлять перед травлением
Алюминий и его сплавы	Хромовый ангидрид — 2 г, серная кислота — 3 мл, вода — 100 мл, насыщенный раствор хлористого натрия в воде — 4 мл; ХТ — погружением в реактив или протирка ватным тампоном	
	Персульфат аммония — 10 г, вода — 90 мл; ХТ — протирка ватным тампоном	Для медно-никелевых сплавов
	10 %-ный водный раствор уксуснокислого (сернокислого) аммония; ЭТ — $j = 0,003 \text{ A / cm}^2$, $U = 10 \text{ В}$, катод — медь	
Алюминий и его сплавы	Азотная кислота — 10 мл, плавиковая кислота — 10 мл, глицерин — 34 мл; ХТ — погружением в реактив	Перед погружением в реактив шлиф подогреть в кипящей воде. Используется в основном для шлифов из чистого алюминия Для алюминиевых сплавов типа дуралюмина
	Плавиковая кислота — 1 мл, азотная кислота — 5 мл, серная кислота — 2,5 мл, вода — 95 мл; ХТ — погружением в реактив	
	25 %-ный водный раствор ортофосфорной кислоты, температура 50 °С; ХТ — погружением в реактив	
Никель и его сплавы	Сервокислый аммоний — 10 г, лимонная кислота — 10 г, вода — 120 мл; ХТ — погружением в реактив	
	Уксусная кислота — 55 мл, азотная кислота — 25 мл, вода — 100 мл; ХТ — погружением в реактив	

Свариваемый металл	Состав реактива и режим химического (ХТ) или электролитического (ЭТ) травления	Примечание
Стали малоуглеродистые, низко- и среднелегированные	20 %-ный водный раствор уксуснокислого аммония; ЭТ — $U = 6-8$ В, $j = 0,15$ А/см ²	
	20 %-ный водный раствор сернокислого аммония; ЭТ — $U = 5-6$ В, $j = 0,15$ А/см ²	
	3—5 %-ный раствор азотной кислоты в этиловом спирте; ХТ — погружением в реактив	
	Пикриновая кислота — 4 г, этиловый спирт — 96 мл; ХТ — погружением в реактив Хлорное железо — 0,5 г, соляная кислота — 1 мл, метиловый спирт 98,5 мл; ЭТ — $U = 10-20$ В; $j = 0,15 \div 0,25$ А/см ² Хромовый ангидрид — 10 г, вода — 100 мл, ЭТ — $U = 6-10$ В, $j = 0,15$ А/см ²	
Стали коррозионно-стойкие и жаропрочные	Азотная кислота — 30 мл, уксусная кислота — 20 мл; ХТ — протирка ватным тампоном	
	Едкий калий — 10 г, красная кровяная соль — 10 г, вода — 100 мл; ХТ — погружением в реактив	
	Азотная кислота — 30 мл, соляная кислота — 24 мл, фосфорная кислота — 8 мл, уксусная кислота — 38 мл; температура раствора 70 °С; ХТ — погружением в реактив	
	10 %-ный водный раствор щавелевой кислоты; ЭТ — $U = 5 \div 10$ В, $j = 0,2$ А/см ²	
Титан и его сплавы	20 %-ный водный раствор уксуснокислого аммония; ЭТ — $U = 5 \div 10$ В, $j = 0,2$ А/см ²	
	Сернокислое железо 1 г, хлористый натрий — 1 г, серная кислота — 2,5 мл, вода — 300 мл; ЭТ — $U = 0,1 \div 0,2$ В, $j = 1 \div 5$ А/см ²	
	Плавиковая кислота — 10 мл, азотная кислота — 10 мл, глицерин — 30 мл; ХТ — погружением в реактив Сернокислое железо — 20 г, сернистая медь — 5 г, серная кислота — 6 г, вода — 250 мл, ХТ — погружением в реактив Хромовый ангидрид — 8 г, вода — 100 мл; ЭТ — $U = 3 \div 4$ В, $j = 0,2$ А/см ²	

Свариваемый металл	Состав реактива и режим химического (ХТ) или электролитического (ЭТ) травления	Примечание
Никобий, цирконий, вольфрам	Азотная кислота — 10 мл, плавиковая кислота — 10 мл, вода (глицерин) — 10 мл; ХТ — погружением в реактив	
Никобий, цирконий, тантал и их сплавы	Азотная кислота — 15 мл, плавиковая кислота — 5 мл, соляная кислота — 15 мл, вода — 70 мл; ХТ — погружением в реактив	
Молибден	0,5 %-ый водный раствор щавелевой кислоты; ЭТ — $U = 2 \div 3$ В, $i = 0,2$ А/см ²	
Тантал	Плавиковая кислота — 2 мл, уксусная кислота — 2 мл, серная кислота — 5 мл; ЭТ — $U = 5$ В, $i = 0,2$ А/см ²	
Золото, серебро, платина	Соляная кислота — 3 мл, азотная кислота — 1 мл; ХТ — погружением в реактив	

Примечания: 1. Плотность кислот: серной — 1,84; соляной — 1,19; азотной — 1,42; уксусной — 1,049; плавиковой — 0,98 г/см³. 2. Длительность травления определяется опытным путем.

для металлографических исследований шлифовали на абразивных бумагах, причем при переходе на очередной номер бумаги с меньшим размером абразивных частиц оправку с образцом промывали водой, а направление шлифования изменяли на 90°.

В последнее время для шлифовки широко используются алмазные пасты различной зернистости (типа АСМ-40, АСМ-10), которые наносят на ватман, закрепленный на вращающемся диске диаметром 200—300 мм шлифовального станка [63]. Частоту вращения шлифовальных дисков (950—1500 об/мин) увеличивают с повышением твердости исследуемого образца.

Контроль за достижением требуемой плоскости сечения зоны сварки производят при обработке микрошлифа на мелкозернистой абразивной бумаге и алмазной пасте, периодически просматривая обрабатываемый торец микрошлифа (при необходимости с помощью лупы 5×). В случае использования прозрачной заливочной пластмассы этот контроль существенно облегчается. Сигналом о достижении требуемой для исследования плоскости в зоне образования сварного соединения и окончании шлифовки служит появление (вариант, показанный на рис. 44, г) или исчезновение (рис. 44, е) контрольной поверхности вставки-свидетеля.

Образцы полировали в основном механическим способом на полировальных станках с использованием алмазных паст марок АСМ, АСМ-1, которые наносили на мягкую ткань (например, бархат).

Для выявления микроструктуры соединения проводили химическое или электролитическое травление изготовленного шлифа. В табл. 10 приведены режимы травления различных металлов и сплавов [63, 124].

Травление сварных соединений из разнородных металлов лучше всего производить в различных реактивах, соблюдая такую последовательность травления, при которой вначале выявляется структура одного из металлов. Структуру другого металла выявляют реактивом, который почти не травит ранее выявленную структуру, что в большинстве случаев достигается соответствующим подбором электролитов.

Продолжительность и режимы травления для каждого конкретного случая определяются опытным путем.

На основании результатов исследований и большого опыта внедрения по точечной и рельефной конденсаторной сварке в первую очередь металлов малых толщин и сечений, а также в определенной мере и металлов толщиной 0,8—3,0 мм составлена [137, 142] табл. 11 свариваемости различных металлов и сплавов как в однородных, так и в разнородных сочетаниях этими способами сварки. При составлении таблицы была принята следующая технологическая характеристика свариваемости металлов этих толщин и сечений: хорошая, если получается высокая прочность точки (вырыв или вязкий срез при механических испытаниях) и не наблюдается прилипания электродов к поверхности свариваемого металла; удовлетворительная — при высокой прочности сварной точки и незначительном прилипании электродов; неудовлетворительная, если не достигается практически достаточная прочность сварной точки и наблюдается значительное прилипание электродов.

Данные табл. 11 показывают, что способами точечной и рельефной конденсаторной сварки получены неразъемные соединения более чем 500 сочетаний различных металлов и сплавов, причем наиболее характерным здесь является то, что, во-первых, это количество сочетаний свариваемых металлов и сплавов значительно больше, чем при любых других способах сварки, а, во-вторых, что данными этой таблицы еще далеко не исчерпаны возможности точечной и рельефной конденсаторной сварки и по мере развития исследований и расширения объемов внедрения этих способов они будут пополняться новыми сочетаниями свариваемых металлов и сплавов.

Из анализа табл. 11 можно также сделать вывод, что хотя представленные в ней металлы и сплавы весьма разнородны и многочисленны, однако в основном они могут быть разделены на следующие основные группы¹: медь и ее сплавы; алюминий, магний и их сплавы; никель и его сплавы; низкоуглеродистые, коррозионно-стойкие и другие стали; химически активные и тугоплавкие металлы и их сплавы; благородные металлы и их сплавы; разнородные металлы и сплавы. Приведенное разделение металлов и сплавов принято в дальнейшем изложении материала этой главы.

¹ Сверхпроводящие материалы [1] здесь не рассматриваются.

Таблица 11. Данные о свариваемости металлов и сплавов

№№ пп	Металл, сплав	С каким металлом (сплавом) сваривается (цифра соответствует порядковому номеру в графе 1)
1	Алюмель	1*, 71*
2	Алюминий А99	2, 3, 4, 5, 6, 13*
3	Алюминий А993	3, 2, 4, 5, 6, 13*
4	Алюминий А995	4, 2, 3, 5, 6, 13*
5	Алюминиевые сплавы типа АМг	5, 2, 3, 4, 6, 13*
6	Алюминиевые сплавы типа АМц	6, 2, 3, 4, 5, 13*
7	Алюминированное железо	7*, 14*, 22*, 38*, 50*, 59* — 63*, 65*
8	Бронзы бериллиевые	8, 9, 10, 15—18, 22, 23*, 25, 26* — 28*, 31*, 33*, 36, 37*, 38*, 40*, 41—44, 45—49, 54—57, 61*, 63*, 68*, 69*, 71*
9	Бронзы оловянно-фосфористые	9, 8, 10, 15—18, 22*, 23*, 25, 26* — 28*, 31*, 33*, 36, 37*, 38, 40*, 41—44, 45—49, 54—57, 61*, 63*, 68*, 69*, 71*
10	Бронзы оловянно-цинковые	10, 8, 9, 15* — 18*, 22*, 23*, 25, 26* — 28*, 31*, 33*, 36, 37*, 38, 40*, 41—44, 46—49, 54—57, 61*, 63*, 68*, 69, 71*
11	Ванадий	11*, 39*, 64* — 66*
12	Вольфрам	12*, 38*, 39*, 51*, 64*
13	Дуралюмин	13*, 2* — 6*
14	Железо «Армко»	14, 7*, 34*, 40*, 50
15	Золото	15, 8—10, 16—18, 20, 22, 25, 26*, 27*, 32*, 33*, 36, 38, 41—44, 46—49, 54* — 57*
16	Золото-никелевые сплавы	16, 8—10, 15, 17—18, 20, 22, 25, 26*, 32*, 33*, 36, 38, 41—44, 46—49, 54* — 57*
17	Золото-платиновые сплавы	17, 8—10, 15, 16, 18, 20, 22, 25, 26*, 32*, 33*, 36, 38, 41—44, 46—49, 54* — 57*
18	Золото-циркониевые сплавы	18, 8—10, 15—17, 20, 22, 25, 26*, 32*, 33*, 36, 38, 41—44, 46—49, 54* — 57*
19	Инвар	19, 36* — 38*, 40*, 61*, 63*, 68*
20	Иридий	20, 15—18
21	Кадмий	21*
22	Ковар	22, 7*, 8—10, 15—18, 23*, 25*, 31*, 36, 38, 45* — 49*, 50, 60* — 63*, 68*, 71*
23	Константан	23, 8* — 10*, 25*, 31*, 33*, 36*, 38*, 40*, 45*, 59* — 63*, 68*, 69*
24	Копель	24
25	Латунь Л63	8—10, 15—18, 22*, 23*, 25, 26* — 28*, 31* — 33*, 36*, 38*, 40*, 41—44, 46* — 49*, 50*, 54—57
26	Латунь Л68	26, 8* — 10*, 15* — 18*, 22*, 25*, 27*, 28*, 31* — 33*, 36*, 38*, 41* — 44*, 46* — 50*, 54* — 57*
27	Латунь Л80	27, 8* — 10*, 15* — 18*, 22*, 25*, 26*, 28*, 31* — 33*, 36*, 38*, 41* — 44*, 46* — 50*, 54* — 57*
28	Латунь Л90	28*, 8* — 10*, 15* — 18*, 25* — 27*
29	Латунь ЛС59	(29), (71)
30	Магниевые сплавы типа МА	30*
31	Манганин	31*, 8* — 10*, 22*, 23*, 25* — 28*, 33*, 36*, 38*, 40*, 45*, 60* — 63*, 68*, 69*, 71*, 74*

№№ пп	Металл, сплав	С каким металлом (сплавом) сваривается (цифра соответствует порядковому номеру в графе I)
32	Медь	32*, 15*—18*, 25*—27*, 34*, 39*, 50*, 64*
33	Мельхиор	33, 8—10, 15—18, 23*, 25*—27*, 31*, 36*—38*, 40*, 61*, 63*, 68*, 71*
34	Молибден	34*, 14*, 32*, 38*, 39*
35	Монель-металл	35*
36	Нейзильбер	36, 8—10, 15—18, 19*, 22*, 23*, 25*—27*, 31*, 33*, 37*, 38, 40*, 45*, 54*—58*, 61*, 63*, 68*, 69*, 71*
37	Никелин	37, 8*—10*, 19*, 33*, 36*, 38*, 40*, 45*, 61*, 63*, 68*, 69*, 71*
38	Никель	38, 7*, 8*—10*, 12, 15—18, 19*, 22, 23*, 25*—27*, 31*, 33*, 34*, 36*, 37*, 39*, 40*, 45*, 50, 59*—63*, 68*, 69*, 71*, 74*
39	Ниобий	39*, 11*, 12*, 32*, 34*, 38*, 65*, 73*
40	Нихром	40, 8*—10*, 14*, 19*, 23*, 25*, 31*, 36*—38*, 45*, 61*, 63*, 68*, 69*, 71*, 74*
41	Палладий	41, 8—10, 15—18, 25, 26*, 27*, 42*—44*, 46*—49*, 54*—57*
42	Палладиево-иридиевые сплавы	42, 8—10, 15—18, 25, 26*, 27*, 41*, 43*, 44*, 46*—49*, 54*—57*
43	Палладиево-медные сплавы	43, 8—10, 15—18, 25, 26*, 27*, 41*, 42*, 44*, 46*—49*, 54*—57*
44	Палладиево-никелевые сплавы	44, 8—10, 15—18, 25, 26*, 27*, 41*—43*, 46*—49*, 54*—57*
45	Пермаллой	45, 8—10, 22, 23*, 31*, 36*—38*, 40*, 61*, 63*, 69*
46	Платина	46, 8—10, 15—18, 22*, 25*—27*, 41*—44*, 47—49, 54*—57*, 61*, 63*
47	Платино-иридиевые сплавы	47, 8—10, 15—18, 22*, 25*—27*, 41*—44*, 46, 48—49, 54*—57*, 61*
48	Платино-никелевые сплавы	48, 8—10, 15—18, 22*, 25*—27*, 41*—44*, 46, 47, 49, 54*—57*, 61*
49	Платино-родиевые сплавы	49, 8—10, 15—18, 22*, 25*—27*, 41*—44*, 46—48, 54*—57*, 61*
50	Платинит	50, 7*, 14, 22, 25*—27*, 32*, 38, 59—63
51	Рений	51, 12
52	Родий	52
53	Свинец	53*
54	Серебро	54, 8—10, 15*—18*, 25, 26*, 27*, 36, 41*—44*, 46*—49*, 55—57
55	Серебряно-медные сплавы	55, 8—10, 15*—18*, 25, 26*, 27*, 36, 41*—44*, 46*—49*, 54, 56, 57
56	Серебряно-палладиевые сплавы	56, 8—10, 15*—18*, 25, 26*, 27*, 36, 41*—44*, 46*—49*, 54, 55, 57
57	Серебряно-платиновые сплавы	57, 8—10, 15*—18*, 25, 26*, 27*, 36, 41*—44*, 46*—49*, 54—56
58	Сормайт	58, 36*, 61*
59	Стали алитированные	59, 7*
60	Стали жаропрочные	60, 7*, 22*, 23*, 31*, 38*, 50, 61*—63*
61	Стали коррозионно-стойкие	61, 7*—10*, 19*, 22*, 23*, 31*, 33*, 36*, 37*, 38*, 40*, 45*, 46*—49*, 50, 58, 62*, 63*
62	Стали низколегированные	62*, 7*, 22*, 23*, 31*, 38*, 50, 61*, 63

№№ пп	Металл, сплав	С каким металлом (сплавом) сваривается (цифра соответствует порядковому номеру в графе 1)
63	Стали низкоуглеродистые	63, 7*, 8*—10*, 19*, 22*, 23*, 31*, 33*, 36*, 37*, 38*, 40*, 45*, 46*—49*, 50, 62
64	Тантал	64*, 11*, 12*, 32*, 39*, 65*, 66*
65	Титан	65, 7*, 11*, 39*, 64*, 66*
66	Титановые сплавы	66, 7*, 11*, 39*, 64*, 65*
67	Торий	67*
68	Ферронихром	68*, 8*—10*, 19*, 22*, 23*, 31*, 33*, 37*, 38*, 40*, 69*, 71*

Примечания: 1 Данные таблицы составлены главным образом на основании исследований и могут быть использованы применительно к сварке такими же способами металлов и сплавов толщифошай; цифры со звездочкой — удовлетворительная; цифра без звездочки в круглых скобках — чных в таблице металлов и сплавов, но чтобы упростить построение таблицы, данные о такой

2. Основные процессы, протекающие в зоне сварки

При точечной и рельефной конденсаторной сварке листовых металлов они плотно сжаты между электродами и нагретая током зона сварки практически не взаимодействует с окружающей средой, поэтому состав свариваемых металлов в результате их переплава (при соединении в жидком состоянии) или нагрева до требуемых температур (при соединении в твердом состоянии) не изменяется. В таких случаях зона сварки является закрытой.

Однако точечной и рельефной конденсаторной сваркой выполняется очень много (главным образом в изделиях радиоэлектроники и приборостроения) типов сварных соединений из таких форм деталей, как круглая с круглой, круглая с листовой и др. В этих случаях получается открытая зона нагрева соединения и поэтому, естественно, что нагретый объем металла может взаимодействовать с окружающей атмосферой и его состав несколько изменяется. Если последнее недопустимо, то сварку следует выполнять в среде инертного газа (реже в вакууме), что иногда и делается на практике.

Тем не менее в большинстве случаев выполнения микросварных соединений, как правило, существенного изменения свойств металлов в открытой зоне сварки не происходит, поскольку процессы ее нагрева весьма кратковременные и такая зона в расплавленном состоянии взаимодействует с окружающей средой практически только от момента появления расплава до начала застывания его поверхностных слоев, что ввиду интенсивного охлаждения (благодаря высокотеплопроводным электродам) происходит очень быстро.

При точечной и рельефной конденсаторной сварке металлов с закрытой зоной соединения чаще всего образуется ядро литого металла с характерной столбчатой структурой, ориентированной в направлении максимального теплоотвода (в электроды). Поскольку зона сварки со всех сторон окружена холодным металлом и ее усадка

№№ шп	Металл, сплав	С каким металлом (сплавом) сваривается (цифра соответствует порядковому номеру в графе 1)
69	Фехраль	69*, 8*—10*, 23*, 31*, 36*—38*, 40*, 45*, 68*, 71*
70	Хром	70*
71	Хромель	71*, 1*, 8*—10*, 22*, (29), 33*, 36*—38*, 40*, 68*, 69*
72	Цинк	72*
73	Цирконий	73*, 39*
74	Элинвар	74, 31*, 38*, 40*

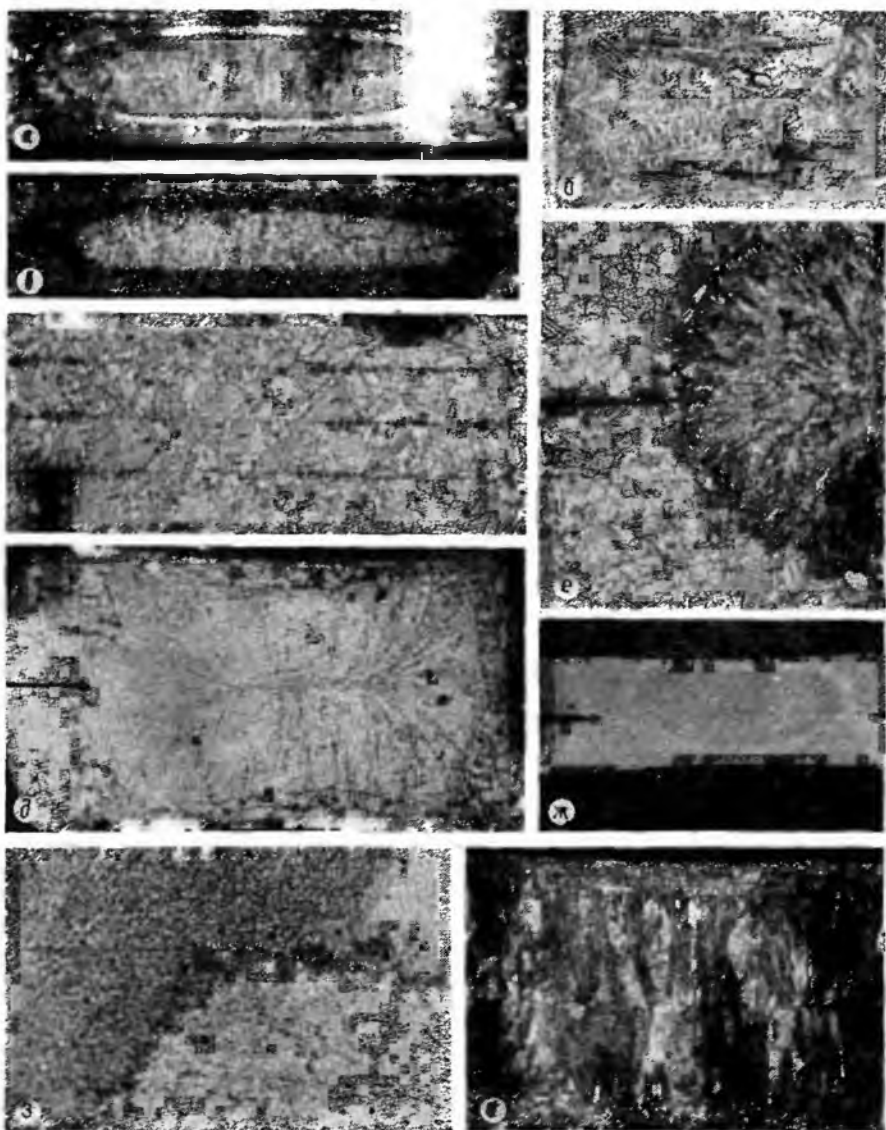
ний по технологии точечной и рельефной конденсаторной микросварки, но во многом могут быть 0,8—2,5 мм. 2. Приняты следующие показатели свариваемости: цифры без звездочки — хорошие, с звездочкой — удовлетворительная. 3. Алюминий и его сплавы не свариваются ни с одним из перечисленных металлов. 4. Углеродистые стали с содержанием углерода более 0,3% не свариваются ни с одним из перечисленных металлов. 5. Неудовлетворительной свариваемости в ней не приводятся.

под действием усилия сжатия может происходить только в замкнутом объеме, то это часто обуславливает [52] образование в литом ядре усадочных раковин (см. рис 33, б).

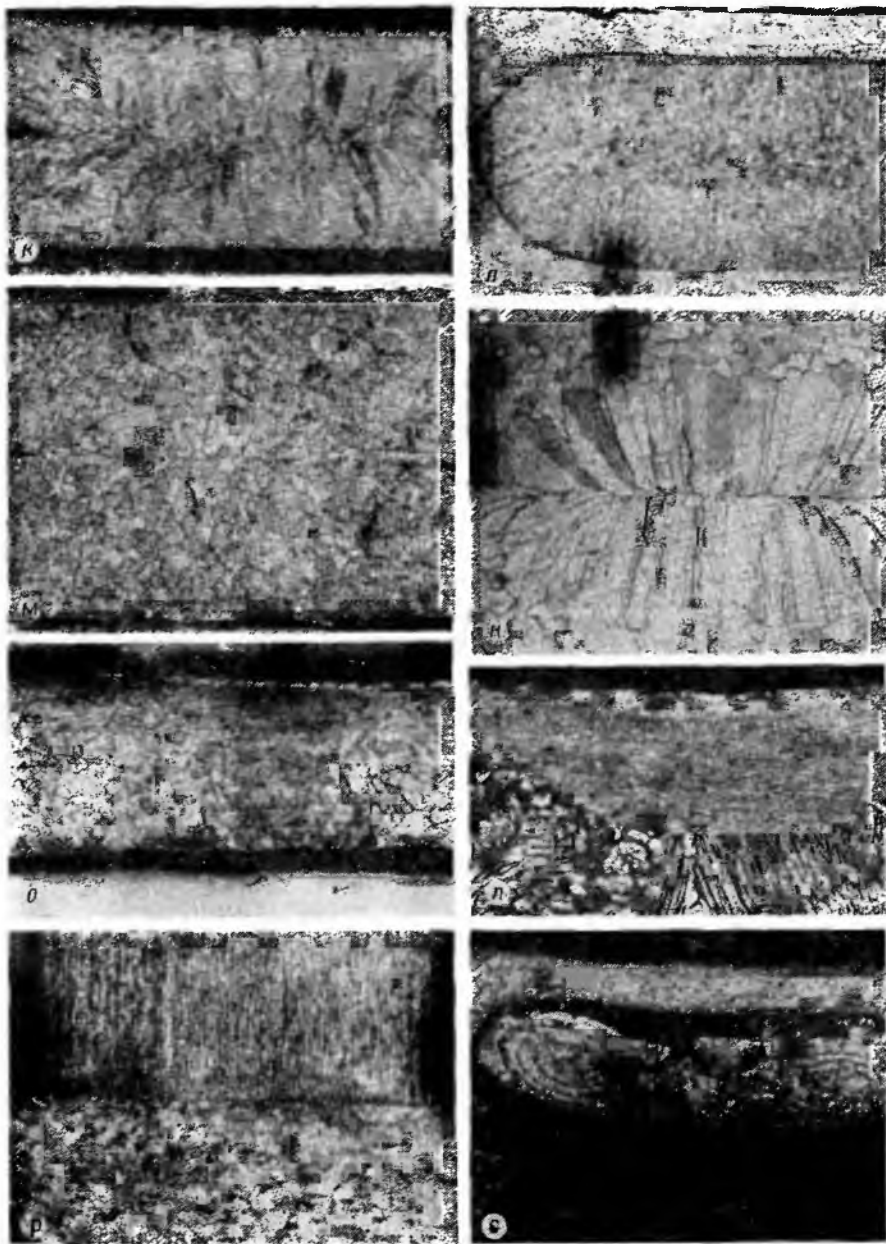
Однако обычным при точечной и рельефной конденсаторной микросварке является столь высокое давление электродов (ввиду очень малой площади зоны сварки), что в результате пластической деформации нагретый металл в кристаллизующемся ядре хорошо уплотняется во всем его объеме и усадочные раковины не образуются. Но в таких соединениях, особенно при сварке сплавов с большим температурным интервалом кристаллизации, возможны большие усадочные напряжения при кристаллизации замкнутого объема ядра и как следствие межкристаллические разрушения металла с образованием небольших трещин (рис. 45, а, б). Трещины могут располагаться как перпендикулярно, так и параллельно линии раздела свариваемых деталей. Если это может отразиться на работоспособности микросварного соединения, то они легко ликвидируются соответствующим повышением усилия сжатия F_a , а также проковкой соединения или уменьшением нагрева зоны сварки.

Что же касается точечных и рельефных микросварных соединений, образующихся на конденсаторных машинах в твердом состоянии, то в них усадочные раковины полностью отсутствуют. В целом же структура таких сварных соединений во многом определяется температурой нагрева и степенью пластической деформации зоны сварки. При конденсаторной микросварке металлов с «открытой» зоной расплавленный металл обычно удаляется из зоны соединения, а значительная пластическая деформация практически исключает образование дефектов усадочного характера.

Особо следует отметить, что способами точечной и рельефной конденсаторной микросварки обычно соединяют очень тонкие цветные и черные металлы со значительно более качественным состоянием их поверхностей, чем, например, в машиностроении, строительстве и некоторых других отраслях промышленности. Этому способствует то обстоятельство, что, во-первых, металлы очень малых



толщин обычно хранятся в сухих и отапливаемых помещениях, а во-вторых, и это главное, изготавливаются они по более высокому классу обработки и перед сваркой проходят химическую обработку поверхности. В связи с этим металлы (включая и нелистового профиля) поступают на сварку с довольно небольшой по толщине пленкой оксидов, что и обуславливает образование при точечной и рельефной конденсаторной микросварке таких соединений, в литых ядрах которых практически нет следов неметаллических включений. Это довольно четко видно на структурах микросварных соединений.



Наконец, при точечной и рельефной конденсаторной микросварке может иметь место образование в ядре точек пор и небольших трещин, выходящих на плоскость раздела (рис. 45, *е*). Однако указанные дефекты, если они недопустимы, довольно легко устраня-

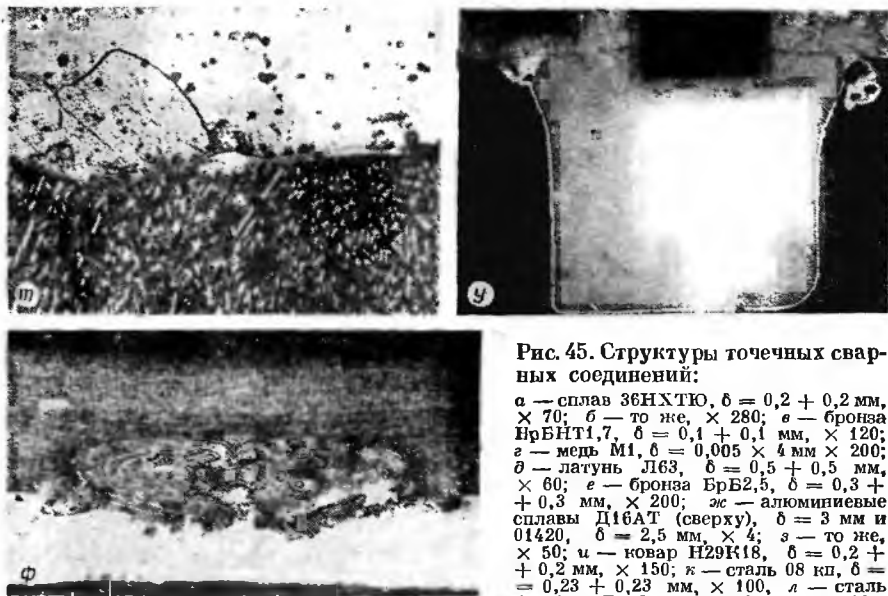


Рис. 45. Структуры точечных сварных соединений:

а — сплав 36НХТЮ, $\delta = 0,2 + 0,2$ мм, $\times 70$; б — то же, $\times 280$; в — бронза БрБНТ1,7, $\delta = 0,1 + 0,1$ мм, $\times 120$; г — медь М1, $\delta = 0,005 \times 4$ мм $\times 200$; д — латунь Л63, $\delta = 0,5 + 0,5$ мм, $\times 60$; е — бронза БрБ2,5, $\delta = 0,3 + 0,3$ мм, $\times 200$; ж — алюминиевые сплавы Д16АТ (сверху), $\delta = 3$ мм и 01420, $\delta = 2,5$ мм, $\times 4$; з — то же, $\times 50$; и — ковар Н29К18, $\delta = 0,2 + 0,2$ мм, $\times 150$; к — сталь 08 кп, $\delta = 0,23 + 0,23$ мм, $\times 100$; л — сталь 12Х18Н9Т, $\delta = 0,3 + 0,3$ мм, $\times 100$; м — ниобий НЭ1, $\delta = 0,5 + 0,5$ мм (сварка в твердом состоянии), $\times 85$; о — серебро Ср999, $\delta = 0,23 + 0,23$ мм, $\times 75$; п — бронза БрБНТ1,9, $\delta = 0,15$ мм (сверху) и латунь Л63, $\delta = 10$ мм, $\times 100$; р — сталь А12, $\delta = 2$ мм (сверху) и латунь Л63, $\delta = 0,5$ мм, $\times 65$; с — сталь 12Х18Н9Т, $\delta = 0,15$ мм (сверху) и сталь 08Х22Н6Т, $\delta = 2$ мм, $\times 170$; т — никром Х20Н80, $\delta = 0,5$ мм (снизу) и железо армо, $\delta = 0,6$ мм (зона соединения), $\times 250$; у — бронза волоочная БрКМцд-1, $\delta = 0,15$ мм (сверху) и БрОФ6,5-0,4, $\delta = 0,7$ мм, $\times 80$; ф — мельхиор МН19, $\delta = 0,15$ мм (сверху и сплав) ЗлСрМгН2-97, $\delta = 0,1$ мм, $\times 100$.

ются корректировкой параметров режима, кроме того, объем этих дефектов весьма мал и практического влияния на прочность и другие показатели качества микросварных соединений они не оказывают.

Выше указывалось, что при точечной и рельефной конденсаторной сварке возможны выплески расплавленного металла. В случае когда этими двумя способами свариваются листовые соединения из-за убыли при выплеске некоторого объема расплавленного металла в ядре могут наблюдаться небольшие усадочные поры и раковины. Однако на прочность соединений эти дефекты как при статических, так и при динамических нагрузках практического влияния не оказывают [228].

В случае сварки в твердом состоянии структура металла в зоне соединения зависит от степени пластической деформации и температуры нагретого металла. Кратковременный нагрев, характерный для конденсаторной сварки сопротивлением, позволяет получать структуру в таком соединении, мало отличающуюся от структуры зоны термического влияния (ЗТВ) ¹.

¹ Принятый в ряде работ [48, 52, 175, 228] термин «околошовная зона» нельзя признать точным, поскольку он более присущ сварке швов. Однако и такие термины, как, например, «околоточечная» или «околостыковая» зона, также не вполне оправданы, поэтому термин «зона термического влияния» наиболее приемлем и принят в данной монографии.

3. Процессы в зоне термического влияния

При точечной и рельефной конденсаторной сварке, как и при других способах контактной сварки сопротивлением, литое ядро сварных точек (при образовании соединений в жидком состоянии) или нагретый в зоне сварки до требуемой температуры определенный объем металла (при сварке в твердом состоянии) окружены ЗТВ [52, 175].

Как известно [52], ширина этой зоны, см,

$$x_{зтв} = 4 \sqrt{a_{с.м} t_{св}}.$$

где $a_{с.м}$ — температуропроводность свариваемого металла, см²/с; $t_{св}$ — время сварки, с.

Из этой формулы видно, что поскольку при точечной и рельефной сварке время $t_{св}$ чаще всего составляет тысячные доли секунды и реже 0,1—0,2 с, ширина ЗТВ вокруг сварных точек получается довольно незначительной [132].

Основные процессы в ЗТВ связаны с ее размерами (шириной) и изменениями в ней свойств свариваемого металла в результате термического цикла и соответствующей пластической деформации. Если точечная и рельефная конденсаторная сварка сопротивлением происходит без расплавления металла, то химический состав свариваемого металла не изменяется и, как правило, такая зона при металлографических исследованиях четко не выявляется. Когда такие сварные соединения образуются с частичным подплавлением ЗТВ (на ее участках, примыкающих непосредственно к расплавленному металлу ядра), могут происходить изменения химического состава и структуры ЗТВ, в результате чего не исключена возможность разупрочнения этой зоны (в частности, ее обезуглероживание при сварке некоторых марок сталей [52]).

В целом же изменения в ЗТВ состава свариваемого металла и его структуры зависят от таких важных факторов, как исходный состав данного металла, предшествующая термическая и механическая обработка, цикл сварки, условия теплоотвода при нагреве, фактическое температурное поле в ЗТВ и характер ее охлаждения. Однако при прочих равных условиях уменьшение ширины ЗТВ, как правило, приводит к улучшению прочностных характеристик сварного соединения.

Выполненные нами расчеты показывают, что при времени $t_{св} = 1 \div 15$ мс, оптимальном при сварке на маломощных точечных конденсаторных машинах типов ТКМ-7, ТКМ-15 и др., значения $x_{зтв,ср}$ малы и обычно не выходят за пределы нескольких десятых миллиметра.

При этом следует особо отметить, что указанные выше расчеты по определению $x_{зтв}$ проведены на основе работы [52], в которой принято, что средняя температура в ЗТВ составляет 25 % $T_{пл}$ свариваемого металла. А при такой сравнительно невысокой температуре в ЗТВ ее разупрочнение при точечной и рельефной конден-

саторной микросварке цветных металлов (для соединения которых широко используется способ сварки) практически не наблюдается.

Однако в непосредственной близости к расплавленному ядру, когда температура нагрева в этой части ЗТВ близка к $T_{пл}$ свариваемого металла, локальные изменения структуры ЗТВ и даже ее состава вполне вероятны. Поэтому чаще всего именно в этой части ЗТВ происходят снижение пластичности, разупрочнение свариваемого металла и разрушение точек при механических испытаниях микросварных соединений. Степень разупрочнения тем меньше, чем быстрее протекает нагрев [52].

Наконец, следует отметить, что при сварке на конденсаторных машинах средней и большой мощности металлов толщиной 0,8—3 мм свойства ЗТВ точечных и рельефных соединений в основном определяются указанными выше факторами. Хотя время $t_{св}$ при выполнении таких соединений значительно больше, чем при конденсаторной микросварке, все же значения $x_{зтв}$ получаются, как правило, меньше, чем при сварке на контактных машинах переменного тока 50 Гц, низкочастотных и постоянного тока. Это благоприятно влияет на свойства металла ЗТВ при точечной и рельефной конденсаторной сварке металлов толщиной 0,8—3 мм. При конденсаторной сварке металлов таких толщин так же, как при конденсаторной микросварке, склонность к процессам выпадания (растворения) составляющих сплава и рекристаллизации снижается с уменьшением времени сварки.

4. Медь и ее сплавы

Контактная сварка сопротивлением меди ввиду ее высокой тепло- и электропроводности, хрупкости при высоких температурах довольно ограничена [49, 52]. Однако точечная и рельефная конденсаторная сварка этого металла толщиной 0,3—0,4 мм при очень малом времени $t_{св}$ применяется, но в первую очередь с использованием медных электродов с впаянными в них цилиндрическими вставками из вольфрама, молибдена и эльконайта со сферическими рабочими частями [142].

Существенное снижение пластичности и прочности сварных соединений из меди связано с кислородом воздуха, образующим с этим металлом оксид меди CuO , который в результате нагрева зоны сварки до температуры плавления располагается по границам крупных зерен в виде эвтектики $Cu-Cu_2O$. Поэтому хорошие результаты можно получить при конденсаторной сварке меди, содержащей раскислители (кремний, фосфор и др.). Другие примеси, присутствующие в меди (сурьма, висмут, сера, свинец), образуют с этим металлом легкоплавкие эвтектики, которые при сварке снижают прочность соединения из-за скопления последних также по границам зерен. В связи с этим содержание примесей в меди, предназначенной для точечной и рельефной конденсаторной сварки, не должно превышать $O_2 - 0,03 \%$, $Bi - 0,003 \%$, $Sb - 0,005 \%$, $Pb - 0,03 \%$, $S - 0,1 \%$.

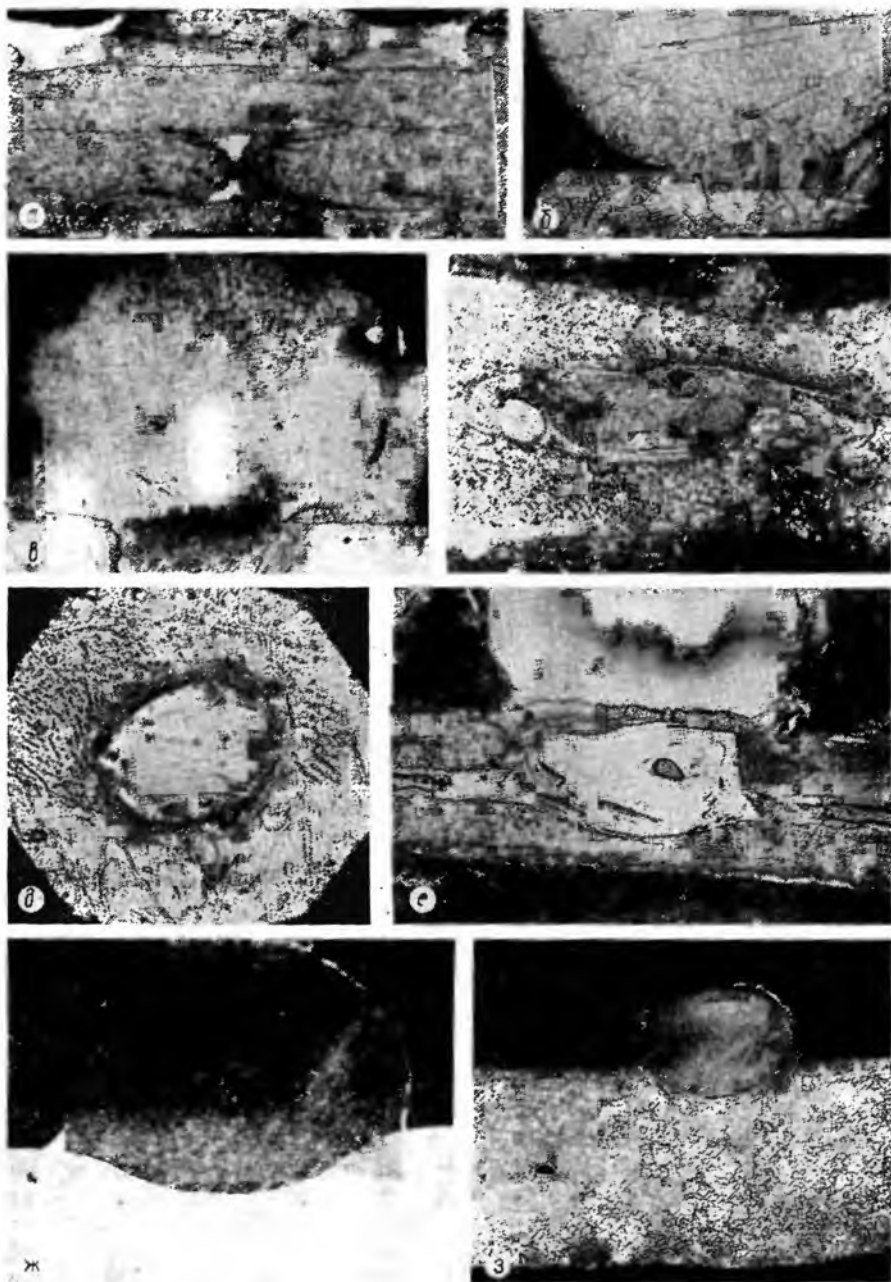
Свариваемость таких широко применяемых медных сплавов, как латуни и бронзы, во многом определяется их составом и электропроводностью, поскольку отдельные легирующие элементы различно влияют на их свойства [98, 99, 124], а значит, и на поведение при сварке [49, 73].

Влияние же основных элементов в латунях и бронзах таково: цинк несколько понижает электропроводность сплава, а значит, облегчает сварку, но во время этого процесса он может испаряться (ввиду довольно низкой температуры его кипения), что обуславливает образование пористого соединения; олово в значительной мере уменьшает электропроводность сплава и придает ему жидкотекучесть, но при сварке не испаряется (температура кипения выше 2000 градусов); фосфор резко понижает электропроводность, легко улетучивается при сварке и раскисляет рабочие поверхности электродов из меди и ее сплавов, что обуславливает не только их повышенный износ, но и порчу поверхностей свариваемых деталей; никель довольно быстро понижает электропроводность сплава, также улучшая этим сварку; свинец не образует твердых растворов с медью и при нагреве выше температуры плавления этого элемента между зернами сплавов появляются его жидкие прослойки, которые снижают прочность сварного соединения [52]. В связи с этим латуни ЛС59 и другие, содержащие свинец, способом конденсаторной сварки соединяются неудовлетворительно.

Латуни с содержанием 30—38 % цинка довольно хорошо свариваются точечной и рельефной конденсаторной сваркой в диапазоне толщин этого сплава 0,02—3 мм, причем вполне качественные соединения получаются и при сварке таких латуней разной толщины (в основном 0,02—0,5 мм к практически произвольной толщине). Однако с увеличением содержания цинка выше 40 % растет температура плавления латуней, свариваемость ухудшается и интенсифицируется процесс испарения этого легирующего элемента. В частности, такой сплав меди с цинком, как томпак (около 40 % Zn), сваривается на точечных и рельефных конденсаторных машинах (даже при малых $t_{св}$ и больших $I_{св}$) практически почти одинаково с медью и также с применением электродов с тугоплавкими вставками.

Ряд марок бронз (оловянно-фосфористых, оловянно-цинковых, кремниевых, бериллиевых и др.) сваривается с помощью точечной и рельефной конденсаторной сварки вполне удовлетворительно, чему во многом способствует их довольно большое удельное сопротивление (в 4—6 раз большее, чем меди). Однако при сварке бериллиевых бронз возможно испарение их основного легирующего элемента, что требует наличия местной вытяжки.

Следует также отметить, что с использованием конденсаторных машин успешно свариваются медно-никелевые сплавы, которые также имеют довольно низкую электропроводность. Ниже приводятся структуры точек из меди и ее сплавов малых толщин, сваренных на серийных точечных конденсаторных машинах.



На рис. 45, г и 46, а показаны структуры сварных соединений из меди М1. Здесь образование сварных соединений происходит без литого ядра точек (в твердом состоянии).

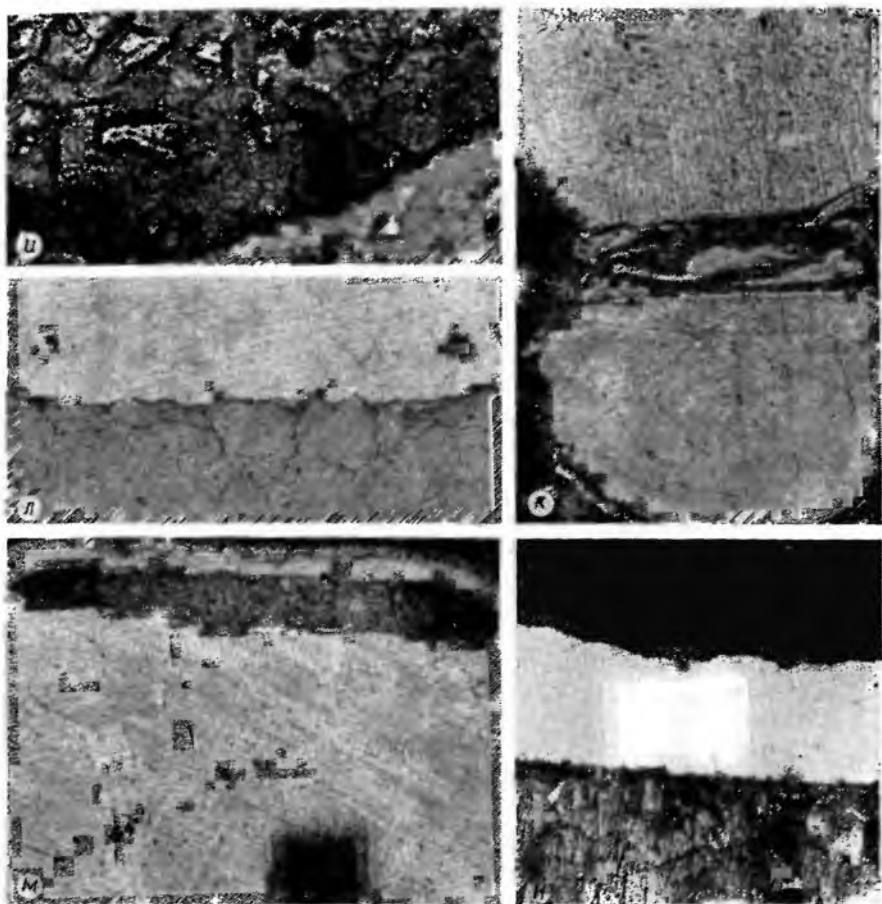


Рис. 46. Структуры рельефно-точечных сварных соединений:

а — медь М1 посеребренная, $d = 0,15 \times 6$ мм (сверху) и медь М1, $\delta = 0,05$ мм, $\times 100$; б) — никель НП2, $d = 0,4$ мм (сверху) и $\delta = 0,07$ мм, $\times 200$; в — сплав сормайт $d = 1,2$ мм (сверху) и сталь 12Х18Н9Т, $\delta = 0,3$ мм, $\times 65$; г — платинит, $\delta = 0,1$ мм, вольфрам, $d = 0,028$ мм и платинит, $\delta = 0,1$ мм, $\times 280$; д — то же, $\times 900$; е — платинит, $d = 0,45$ мм (сверху) и никель НП2, $d = 0,5$ мм, $\times 110$; ж — ковар Н29К18 золоченый, $d = 0,25$ мм и никель НП2, $d = 0,4$ мм, $\times 100$; з — то же, $\times 700$; к — никель НП2, $d = 0,4$ мм (сверху) и платинит, $d = 0,3$ мм, $\times 200$; л — бронза БрБ2,5, $\delta = 0,15$ мм (сверху) и сплав СпМ2НЦр-99, $d = 0,8$ мм, $\times 500$; м — медь М1, $d = 0,15 \times 4$ мм (провод в лаковой изоляции), армированная трубкой из никеля НП2, $\delta = 0,05$ мм и ковар Н29К18, $d = 0,7$ мм, $\times 100$; н — то же, $\times 700$.

При сварке латуни Л63 (рис. 45, д) образуется ядро с четко выраженным столбчатым строением его литой структуры, ориентированным к центру точки и направленным вдоль оси (с которой совпадает направление максимального теплоотвода из зоны сварки) обоих электродов. Структура сварной точки из бронзы БрБ2,5 (рис. 45, е) характерная литым ядром с глубиной проплавления примерно на 80 % в каждой из деталей и столбчатым строением структуры охлажденного расплава.

Широкое применение в промышленности получили медно-никелевые сплавы: мельхиор (МНЖМц 30—0,8—1, МН19), нейзильбер (МНц15-20) и манганин (МНМц3-12).

Мельхиором называется двойной и более сложный сплав меди, в котором основным легирующим компонентом является никель. По своей структуре мельхиор является сплавом типа твердого раствора, что обеспечивает его хорошую обработку в горячем и холодном состояниях.

Нейзильбер принадлежит к медным сплавам тройной системы $\text{Cu} - \text{Ni} - \text{Zn}$ и содержит 5—35 % Ni и 13—45 % Zn. Повышенная его прочность по сравнению с мельхиором обусловлена легированием цинком [124].

Важнейшими свойствами манганина являются весьма малый температурный коэффициент электросопротивления при высоком электросопротивлении и хорошая пластичность.

Повышенное сопротивление всех этих сплавов способствует быстрому их нагреву и обеспечивает удовлетворительную свариваемость при точечной и рельефной конденсаторной сварке.

5. Алюминий, магний и их сплавы

Чистый алюминий применяется в промышленности сравнительно в небольших объемах, поскольку ряд сплавов на основе этого металла (с добавками магния, цинка, марганца, меди и др.), упрочняемых наклепом или термообработкой, обладает значительно большей прочностью, чем алюминий.

Существенные затруднения при сварке алюминия обуславливаются легкой его окисляемостью в твердом состоянии. Образующаяся при этом тугоплавкая пленка оксида Al_2O_3 препятствует образованию сварного соединения и является источником неметаллических включений в металле ядра точки. Одним из эффективных способов подготовки алюминиевых деталей к сварке является химическая обработка их поверхностей.

Как высокопрочные алюминиевые сплавы, так и алюминий имеют высокую тепло- и электропроводность, которая по сравнению с аналогичными параметрами меди составляет около 62 % у алюминия и 20—55 % у его сплавов. В связи с этим и с их большой теплопроводностью при сварке сопротивлением всех данных материалов требуются значительные токи $I_{\text{св}}$ и малое время $t_{\text{св}}$, что легко достигается на конденсаторных машинах.

Точечная и рельефная конденсаторная сварка сопротивлением нашла широкое применение как один из наиболее рациональных способов соединения алюминия и его сплавов в первую очередь толщиной до 0,5 мм, а также в довольно заметных объемах при их толщине 0,8—2,5 мм [175, 228].

Рациональность применения точечной и рельефной конденсаторной сварки алюминия и его сплавов обусловлена не только их высокой электро- и теплопроводностью, но и следующими особен-

ностями: алюминий и его сплавы обладают высокими коэффициентами теплового расширения, что обуславливает увеличение сварочных деформаций, однако последние тем меньше, чем жестче режимы сварки этих материалов; высокопрочные алюминиевые сплавы, как наклепанные, так и термически обработанные, при нагреве в зоне сварки могут существенно разупрочняться, но этот крайне нежелательный эффект также уменьшается с сокращением при сварке этих сплавов зоны нагрева благодаря жестким режимам.

Высокопрочные алюминиевые сплавы имеют свойство кристаллизироваться в довольно широком интервале температур и склонны к образованию горячих трещин, что крайне нежелательно и может быть предотвращено благодаря использованию больших усилий сжатия в процессе кристаллизации расплава. Однако эта их особенность имеет прямое отношение только к механизмам сжатия оборудования для контактной сварки сопротивлением и, естественно, должна быть учтена при решении вопроса о рациональности использования для сварки этих сплавов конденсаторных машин.

Современные отечественные конденсаторные машины для точечной сварки средней и большой мощности (в частности, типа МТК-5001, МТК-6301 и др.) обеспечивают получение ковочных усилий (примерно в 2 раза превышающих усилия сжатия), а на маломощных машинах (типа ТКМ-7, ТКМ-15, ТКМ-17 и др.) хотя и нельзя производить проковку (как дополнительную операцию обработки) свариваемых металлов, однако получаемые достаточно большие усилия сжатия обычно оказываются вполне достаточными для предотвращения образования трещин при точечной и рельефной сварке очень тонких и тонких (до 0,5 мм) высокопрочных алюминиевых сплавов.

Точечная и рельефная сварка сопротивлением алюминия марок А95, А97, А99 и его сплавов Д16АТ, Д16АМ, АМг, АМц и других толщиной до 0,5 мм успешно применяется при использовании маломощных конденсаторных машин. Эти марки алюминия и его сплавов нашли заметное применение в различных отраслях приборостроения, где из них часто изготавливают ответственные узлы и детали.

Прочность сварных точек из различных марок алюминия и его сплавов получается высокой и, в частности, при микросварке практически всегда большей тех усилий, при которых недопустимо деформируется узел или сборки из данной марки алюминия и его сплавов. Высокая прочность точек обеспечивается при конденсаторной сварке благодаря (рис. 45, ж, з) литому ядру и весьма незначительной ЗТВ. При сварке алюминия и его сплавов с малым интервалом кристаллизации расплава в литой зоне наблюдается преимущественно столбчатая структура, а при сварке алюминиевых сплавов с широким интервалом кристаллизации — равноосная.

При конденсаторной сварке металлов алюминия и его сплавов толщиной 0,8—2,5 мм в связи с увеличением длительности нагрева по сравнению со сваркой металлов малых толщин растёт ширина зоны

термического влияния и в большей мере проявляются некоторые структурные изменения (например, рост зерна в этой зоне или скопление в ней при сварке сплавов АМг6, Д16, Д19 металла, обогащенного легирующими элементами). Однако в пределах практически используемых режимов точечной конденсаторной сварки существенных изменений усталостной и статической прочности не наблюдается.

Наконец, следует отметить, что в процессе сварки происходит налипание как свариваемого металла на поверхность рабочей части электрода, так и материала электрода на поверхность свариваемого металла. При этом следы меди на свариваемых деталях могут вызывать местную коррозию, а загрязнение электродов частицами свариваемого металла обуславливает необходимость более частой их зачистки (через каждые 20—200 сварных точек).

Магний в чистом виде для изготовления изделий не применяется, так как обладает невысокой прочностью и пластичностью, а также низкой коррозионной стойкостью. Однако его сплавы с алюминием, марганцем, цинком и другими металлами применяются в заметных объемах, причем они значительно легче алюминиевых сплавов.

Большинство магниевых сплавов характеризуется также высокой коррозионной стойкостью. По сравнению с алюминиевыми сплавами они имеют большую пластичность. В связи с этим точечная контактная сварка сопротивлением таких сплавов магния, как МА1, МА2, МА8 и др., может выполняться при меньших усилиях сжатия и $t_{\text{св}}$, чем, например, дуралюмина Д16 [175].

Свариваемые на контактных машинах магниевые сплавы обычно находятся в наклепанном состоянии [52]. Тепло- и электропроводность этих сплавов несколько меньше, чем алюминиевых. Однако поскольку эти показатели у магниевых сплавов все же меньше, применение для их соединения еще более короткого, чем при контактной сварке алюминиевых сплавов, времени $t_{\text{св}}$, а также несколько повышенных $I_{\text{св}}$ необходимо, что также свидетельствует о целесообразности сварки этих сплавов на конденсаторных машинах. Поскольку магниевые сплавы имеют довольно высокий коэффициент линейного расширения и при длительном их нагреве сварные соединения из этих сплавов в значительной степени деформируются, применение точечной и рельефной конденсаторной сварки позволяет резко снизить этот дефект.

В настоящее время на точечных конденсаторных машинах малой мощности свариваются только магниевые сплавы (МА1, МА2, МА8) толщиной 0,5—0,7 мм, эти же сплавы толщиной 0,8—2,5 мм в основном сваривают при $t_{\text{св}} = 0,06 \div 0,24$ с на контактных машинах средней и большой мощности других разновидностей (низкочастотных, переменного тока 50 Гц и др.). Последнее во многом объясняется тем, что в нашей стране серийное производство мощных точечных конденсаторных машин все еще отстает от запросов промышленности.

6. Никель и его сплавы

Никель и его сплавы довольно широко применяются в промышленности. Они используются в приборостроении, электронной технике, что обусловлено рядом их положительных качеств (высокие эмиссионные свойства, благоприятное сочетание прочности и пластичности в отожженном состоянии, способность восприятия практически всех видов механической обработки даже в холодном состоянии и др.).

Небольшие количества примесей кобальта, железа, меди и кремния, образующие с никелем твердые растворы, повышают его твердость, прочность и электросопротивление и улучшают свариваемость. Содержание кислорода в никеле и его сплавах выше 0,001 % затрудняет процесс сварки из-за образования эвтектики $\text{Ni} - \text{NiO}$, располагающейся вокруг зерен и снижающей прочностные характеристики соединения.

Отжиг никеля, содержащего повышенное количество кислорода, в водороде (этот технологический процесс широко используется в электронной технике) приводит к его охрупчиванию [55].

Значительно снижают прочность и приводят к образованию трещин в сварных соединениях примеси серы, которая образует с никелем низкоплавкую эвтектику $\text{Ni}_3\text{S}_2 - \text{Ni}$ с температурой плавления 625 °С. Установлено, что содержание серы в чистом никеле, применяемом в электронной промышленности, должно быть не более 0,002 %. Наличие в составе никеля магния и марганца нейтрализует вредное влияние серы благодаря образованию тугоплавкой эвтектики, которая располагается соответственно внутри зерен или по их границам [55]. Поэтому в сплавах никеля, содержащих марганец и магний, допускается до 0,005 % S. В электронной технике наиболее широко используется никель НП1, НП2 и НЭ (никель электронно-лучевой плавки).

На рис. 22, в, 33, а и 46, б показаны типичные структуры сварных соединений из никеля НП2. При сварке двух листов (см. рис. 33, а) и проволоки с листом (рис. 46, б) наблюдаются образование литого ядра и рост столбчатых кристаллитов от зерен основного металла. При сварке двух проволок вкрест расплавленный металл выдавлен из зоны соединения (см. рис. 22, б).

Широкое применение в электронной и других отраслях промышленности получил ковар марки Н29К18 (28,5—29,5 % Ni, 17—18 % Co, 45,5—47,5 % Fe, 0,4 % Mn, остальное Cu) для корпусных элементов приборов и различных выводов (особенно когда требуется обеспечить качественную пайку вывода со стеклом типа боросиликатного). Этот металл хорошо соединяется точечной и рельефной конденсаторной сваркой (рис. 45, и). Структура сварной точки — литая столбчатая, четко видна ориентация кристаллов к центру точки, расположенной симметрично поверхности раздела, и их направленность в сторону примыкания электродов.

Весьма распространенным сплавом в электровакуумных приборах является платинит, т. е. сплав Н42 (42,5—44 % Ni, 0,6 % Mn, около

56,5—55 % Fe с небольшими добавками Si, C, S и P), который покрыт медной оболочкой толщиной 15—50 мкм и поставляется в виде проволоки. Платинит представляет собой гамма-твердый раствор, который не испытывает превращений до температуры примерно 1400 °С, отличается высоким удельным сопротивлением и малой теплопроводностью. Важнейшим достоинством платинита как материала для изготовления герметичных спаев с легкоплавкими стеклами в электровакуумных приборах (вместо ранее применявшейся для этих целей очень дорогой платины) является то, что он имеет такой же коэффициент линейного расширения, как указанные выше стекла, а также хорошо сплавляется с ними. Платинит хорошо сваривается как на контактных машинах переменного тока 50 Гц, так и на конденсаторных. Кроме того, высокое качество соединений получается при контактной сварке сопротивлением платинита с другими металлами (никелем и его сплавами, медью, низкоуглеродистыми сталями и др.). В электровакуумных приборах именно сочетания платинита с другими металлами и сплавами наиболее широко применяются и свариваются.

Хорошо свариваются и такие широко используемые никелевые сплавы, как константан (МНМц40=1,5) и мельхиор (МН-19). Оба этих сплава имеют довольно высокое удельное электросопротивление (соответственно 0,48 и 0,28 Ом · мм²/м). Интенсивное тепловыделение при контактной сварке этих сплавов способствует быстрому нагреву зоны сварки. Свариваемость их, как и ряда других сплавов с высоким содержанием никеля (например, нейзильбера МНМц15-20), вполне удовлетворительная.

Хорошо свариваются на конденсаторных машинах и такие сплавы никеля, как пермаллой, инвар, нихром, пермендур и др.

7. Низкоуглеродистые, коррозионно-стойкие и другие стали

Тонкие низкоуглеродистые стали (до 0,15 % С) весьма пластичны при высоких температурах, имеют малую склонность к закалке и при чистой поверхности характеризуются хорошей свариваемостью как на точечных контактных машинах переменного тока, так и на конденсаторных. Вместе с тем установлено [67], что при точечной и рельефной контактной сварке низкоуглеродистых сталей в результате быстрого нагрева и охлаждения создаются условия для образования участков металла с различной степенью закалки. Это обусловлено тем, что в местах, где сосредоточен структурно-свободный цементит, при нагреве образуются участки аустенита с высоким содержанием углерода, который не успевает диффундировать в окружающие слои металла. При сварке стали 08кп участки местной закалки в зоне литого ядра не наблюдаются. Для точечных и рельефных сварных соединений из низкоуглеродистых сталей характерна достаточно высокая статическая и циклическая прочность.

Типичная структура точечного сварного соединения низкоуглеродистой стали приведена на рис. 45, ж. Для этих соединений характерно образование литого ядра с дендритной структурой.

В последнее время для увеличения долговечности и предохранения от интенсивного развития коррозии изделий различного назначения широко применяют низкоуглеродистые стали с покрытиями цинком, оловом, хромом, никелем и др. При сварке металл покрытия может переходить на рабочую часть электрода, что обуславливает частую ее зачистку. С увеличением толщины покрытия свариваемость ухудшается, уменьшается количество сварных точек до зачистки рабочей поверхности электрода.

Хорошие результаты получены при точечной и рельефной сварке низкоуглеродистой стали 08кп, покрытой хромом (40—50 мкм) методом вакуумного распыления. Это покрытие в контакте деталей при сварке расплавляется и легирует металл сварной точки; поры, раковины и другие дефекты в соединении отсутствуют.

Прочность сварных соединений из низкоуглеродистых сталей с покрытиями несколько выше, чем у непокрытых (за счет сплавления покрытия вокруг литого ядра и благодаря этому некоторого увеличения его диаметра).

При точечной и рельефной сварке углеродистых и низколегированных сталей повышенное содержание углерода и легирующих примесей в металле оказывает значительное влияние на процесс формирования соединений и уменьшает критические скорости охлаждения, при которых сталь закаливается [67]. Поэтому после сварки этих металлов проводят термообработку точек между электродами машины.

В связи с тем что конденсаторные машины с таким термическим циклом разработаны только в последнее время (см. главу VII), сварка углеродистых и низколегированных сталей выполняется в основном на контактных машинах переменного тока.

Коррозионно-стойкие стали (12X18H9, 12X18H9T, 08X18H10, 12X18H12T, ВНС2, ВНС4, 1X17H2, X17H2 и др.) обладают низкой тепло- и электропроводностью и должны свариваться на сравнительно жестких режимах. Кроме того, повышенная прочность некоторых из этих сталей требует применения при их сварке сопротивлением значительных усилий сжатия.

Однако нечувствительность многих марок коррозионно-стойких сталей к образованию трещин дает возможность чаще всего применять при контактной сварке сопротивлением простейшие циклы и в первую очередь без ковочного усилия, термообработки и подогрева. Исключением из этого правила является, в частности, необходимость дополнительной термической обработки зоны точечной сварки некоторых марок подкаливающихся сталей (14X17H2, 12X13 и др.), что делается непосредственно в контактной машине током термообработки $I_{то}$ в течение времени $t_{то}$. Кроме того, при сварке сопротивлением коррозионно-стойких сталей мартенситного класса (типа ВНС, СН) необходимо применение повышенных усилий сжатия [228].

Поскольку в изделиях приборостроения и радиоэлектроники кор-

розионно-стойкие стали разных марок толщиной до 0,5 мм применяются довольно широко, а одним из важнейших требований к качеству микросварных точечных и рельефных соединений является внешний вид и незначительная ЗТВ, применение для их получения конденсаторных машин малой мощности является необходимым для выполнения данного условия.

Типичная структура точечного сварного соединения из стали 12X18H9T, полученная способом конденсаторной сварки, приведена на рис. 45, л. Здесь четко видна столбчатая литая структура. Столбчатые кристаллиты внутри точки направлены перпендикулярно к границам расплавления свариваемых листов.

8. Химически активные и тугоплавкие металлы и их сплавы

Как известно, к этой довольно большой группе относятся следующие металлы с температурой плавления выше 1650—1700 °C [53, 55, 69]: титан, цирконий, хром, ванадий, гафний, ниобий, молибден, тантал и вольфрам [237].

Из указанных металлов способами контактной сварки удовлетворительной свариваемостью обладают тантал, ниобий, титан, ванадий и цирконий, а свариваемость остальных металлов несколько ограничена. Однако практически для всех этих металлов предпочтительным является применение конденсаторной сварки сопротивлением с характерными для нее весьма кратковременными импульсами сварочного тока большой силы.

Это в первую очередь связано с огромной реакционной способностью (химической активностью) всех указанных выше тугоплавких металлов соединяться с газами атмосферного воздуха в нагретом (особенно расплавленном) состоянии. Ввиду очень малых значений $t_{св}$ при конденсаторной сварке сопротивлением эти металлы находятся в таком состоянии весьма кратковременно. Кроме того, при соединении точками листовых тугоплавких металлов зона их соединения уплотнена благодаря усилию сжатия электродов и довольно надежно защищена от атмосферы (это общее достоинство в целом контактной, а значит, и конденсаторной сварки сопротивлением). Применение небольших и очень малых $t_{св}$ позволяет при прочих равных условиях существенно уменьшить нагрев, а значит, и износ электродов, поскольку высокая химическая активность тугоплавких металлов обуславливает интенсивное окисление нагретых контактных поверхностей рабочих частей электродов в интервалах между сваркой двух точек (когда электроды разведены). Наконец, значительная кратковременность нагрева тугоплавких металлов при конденсаторной сварке в определенной мере предотвращает чрезмерный рост зерен в зоне их соединения.

Перед выполнением точечной и рельефной конденсаторной сварки химически активных и тугоплавких металлов необходимо обеспечить очистку их поверхности от загрязнений и окисных пленок.

Примеси внедрения в зависимости от формы, количества и места их выделения резко ухудшают свойства сварных соединений из химически активных и тугоплавких металлов и сплавов (обуславливают склонность к кристаллизационным трещинам, снижают пластичность и коррозионную стойкость и др.).

Удовлетворительное качество сварных соединений из указанных металлов можно получить при ограниченном содержании примесей внедрения в основном металле. Так, в ниобиевых сплавах допускается следующее предельное отклонение примесей [69]:

$O_2 \leq 0,02 \%$; $N_2 \leq 0,03 \%$; $H_2 \leq 0,005 \%$.

Титан и сплавы на его основе ввиду такой их совокупности свойств, как высокая прочность при малой плотности и большая коррозионная стойкость (подобная стойкости нержавеющей стали), являются одними из важнейших конструкционных материалов и находят все большее применение в различных отраслях промышленности, из которых на первом месте должны быть названы самолетостроение, ракетная техника и др.

Широко применяемые сплавы титана (типа ВТ1, ОТ-4) имеют довольно низкую электро- и теплопроводность и могут свариваться на контактных машинах при сравнительно малых значениях $I_{св}$ и F_a , причем сварные точки имеют литую структуру, граница которой с основным металлом является нерезкой [228]. Однако эта граница получается довольно четкой, когда свариваются такие титановые сплавы, как ВТ5, ВТ15 и др. Титановые сплавы разных марок толщиной 0,1—1,5 мм хорошо свариваются на конденсаторных машинах.

Необходимо отметить, что титан имеет большую склонность к росту зерен при нагреве до высоких температур, чему способствует и его низкая теплопроводность, обуславливающая увеличение времени пребывания расплавленного металла при высокой температуре. Использование способа конденсаторной сварки сопротивлением, отличающегося малым временем сварки, позволяет в значительной мере устранить эти трудности. Малый температурный интервал кристаллизации, повышенная прочность и пластичность титана и его сплавов в области высоких температур практически исключают образование кристаллизационных трещин. Поры, иногда наблюдаемые в литой зоне точечного сварного соединения, в большинстве случаев обусловлены несоблюдением требований технологического процесса (некачественная подготовка поверхности металла, снижение F_a и др.).

Типичным для структур точечных сварных соединений титановых сплавов является литое ядро [228]. Цирконий и гафний по свариваемости близки к титану.

Для ниобия и ванадия характерна высокая чувствительность к примесям внедрения [69], которые скапливаются по границам кристаллитов и снижают пластические свойства сварных соединений. Поэтому удовлетворительные свойства таких соединений получают при ограничении содержания примесей внедрения в этих металлах. Тантал в отличие от ниобия и ванадия такой чувствительности при сварке к примесям внедрения не имеет.

Одной из причин снижения пластических свойств и прочности точечных сварных соединений из ниобия, ванадия и тантала является процесс рекристаллизации. Сплавы на основе этих металлов более чувствительны к термическим циклам сварки, чем чистые металлы, из-за характерного для них процесса выпадания вторичных фаз и дисперсионного твердения, что также обуславливает снижение пластичности. Поэтому применение для их точечного соединения трансформированного разряда конденсаторов, обеспечивающего кратковременный нагрев зоны соединения, позволяет в значительной мере устранить эти трудности.

Типичные структуры точечных сварных соединений из ниобия, полученные конденсаторной сваркой, приведены на рис. 45, м, н.

Молибден, вольфрам и хром отличаются крайне высокой чувствительностью к примесям внедрения, склонностью к хрупкому разрушению в литом и рекристаллизованном состоянии и низкая пластичность. Примеси внедрения образуют легкоплавкие эвтектики на границах зерен, что вызывает склонность сварных точек к кристаллизационным трещинам. Для уменьшения влияния примесей внедрения сплавы на основе молибдена и вольфрама легируют титаном, цирконием, рением, гафнием и др. Существенному очищению границ зерен в этих металлах от примесей, повышению предельной растворимости примесей внедрения, а следовательно, резкому уменьшению склонности к хрупкому разрушению и повышению пластичности сварного соединения способствует введение рения (до 25 %). Отжиг молибдена и вольфрама перед сваркой в вакууме, который широко используется в электронной промышленности, уменьшает содержание примесей внедрения и способствует повышению качества сварных соединений.

Значительно улучшает качество соединений использование в контакте деталь — деталь при конденсаторной сварке вольфрама прокладок из тантала, ниобия и никеля, а при сварке молибдена — титана и меди [68, 121, 237], причем лучшие результаты получаются в случае рельефной насечки на прокладках. Для демпфирования процесса схватывания рабочей поверхности электродов с поверхностью тугоплавкого материала на последнюю наносят тонкий слой графита и обеспечивают интенсивное охлаждение электродов.

9. Благородные металлы и их сплавы

Практически все благородные металлы имеют высокую коррозионную стойкость при комнатной температуре, а при более высоких температурах большинство из них, хотя и может окисляться, но образующиеся при этом оксиды нестойки и при дальнейшем нагреве улетучиваются (или разлагаются). В связи с такими свойствами благородных металлов при их точечной и рельефной конденсаторной сварке сопротивлением зона расплава и сами соединения с наружных сторон остаются после охлаждения практически

с неизменным исходным химическим составом (в том числе и при открытой зоне плавления свариваемых проволок). Поскольку благородные металлы обладают довольно низкими удельными сопротивлениями (в первую очередь золото и серебро), для их контактной сварки требуются концентрированные источники тепла, что легко достигается на конденсаторных машинах.

Исследования по точечной и рельефной конденсаторной сварке серебра, золота, платины, палладия и их сплавов проведены в весьма ограниченных объемах, причем в основном в лабораторных условиях на маломощных конденсаторных машинах типа ТКМ. Как правило, сварные соединения из золота, платины, палладия и их сплавов получаются с литыми ядрами точек без каких-либо существенных дефектов.

Наибольшие трудности возникают при сварке серебра и его сплавов, так как высокая растворимость кислорода в жидком серебре и резкое снижение его растворимости в закристаллизовавшемся металле приводят к выделению кислорода из раствора. При этом образуются оксид Ag_2O и эвтектика $\text{Ag} - \text{Ag}_2\text{O}$, что может обуславливать некоторую хрупкость сварного соединения. Типичная структура точечного сварного соединения из чистого серебра приведена на рис. 45, о.

Чаще на практике необходимо соединять точечной и рельефной конденсаторной сваркой благородные металлы и сплавы с другими металлами и сплавами. Свариваемость таких металлов рассмотрена ниже.

10. Разнородные металлы и сплавы

Одной из наиболее характерных особенностей внедрения точечной и рельефной конденсаторной микросварки является то, что основная часть выполняемых этими способами неразъемных соединений изготавливается из разнородных металлов, причем очень широко применяются сочетания из деталей как разной толщины (диаметров), так и различных по профилю. Довольно часто выполнение микросварных соединений связано с определенными металлургическими и технологическими трудностями [202], которые не всегда преодолимы. В частности, и это хорошо видно из табл. 11, с алюминием и его сплавами не удается удовлетворительно сварить ни один из металлов и сплавов, который не относится к алюминиевым. Однако данные этой же таблицы показывают, что все же большинство хорошо и удовлетворительно свариваемых на конденсаторных машинах пар металлов и сплавов являются разнородными.

Решающее влияние на свариваемость разнородных металлов оказывает их металлургическая совместимость. Без каких-либо затруднений способами точечной и рельефной конденсаторной сварки выполняются соединения из разнородных металлов и сплавов с близкими теплофизическими характеристиками и неограниченной взаимной растворимостью в жидком и твердом состоянии.

Однако затруднена сварка разнородных металлов и сплавов с резко отличающимися теплофизическими свойствами (температура плавления, теплопроводность и др.), ограниченной взаимной растворимостью и особенно, если свариваемые металлы образуют интерметаллиды (например, алюминий и сталь, титан и сталь и др.), значительно снижающие прочность и пластичность соединения. Выполнение неразъемных соединений из таких металлов способом конденсаторной сварки сопротивлением позволяет (по сравнению со сваркой на контактных машинах переменного тока) сократить время нагрева и, следовательно, снизить толщину интерметаллидной прослойки. Следует также отметить, что допустимый размер этой прослойки зависит от ряда факторов: условий работы конструкции сварного узла, качества и свойств свариваемых металлов и др. Для улучшения свариваемости и исключения образования интерметаллидов при конденсаторной сварке разнородных металлов используют покрытия и прокладки (в контакте деталь — деталь) из материалов, обладающих неограниченной или значительной взаимной растворимостью с каждым из свариваемых металлов.

Ниже приводится ряд характерных структур микросварных соединений из разнородных металлов и сплавов, показывающих довольно широкие возможности конденсаторной сварки сопротивлением и в этой области.

На рис. 45, *n* показана структура сварного соединения сплавов, незначительно отличающихся по теплофизическим свойствам (из бронзы БрБНТ 1,9 и латуни Л63 неравных толщин). Здесь четко виден литой металл сварной точки, расположенный практически симметрично линии сплавления. При сварке этой же латуни со сталью (рис. 45, *p*) взаимное проплавление не наблюдается, а межкатомное и объемное взаимодействие при формировании соединения происходит в твердом состоянии.

При точечной сварке разнородных сталей, например, аустенитно-ферритного (08Х22Н6Т) и аустенитного (12Х18Н9Т) классов как равных, так и неравных толщин ядро сварной точки (рис. 45, *c*) обычно расположено симметрично относительно плоскости сплавления, а находящийся в этом ядре жидкий металл интенсивно перемешан¹, причем здесь и в большинстве других случаев сварки разнородных металлов в литой зоне наблюдаются характерные завихрения металла, свидетельствующие о его неоднородности. Измерения микротвердости на шлифах не выявили участков повышенной твердости, выпадение карбидов хрома не обнаружено.

Сварка таких разнородных металлов, как практически чистое железо и нихром, обеспечивает в основном формирование соединений в твердом состоянии (рис. 45, *m*). В этом случае отдельные гребешки железа армко проникают на незначительную глубину в нихром.

¹ Существует гипотеза [175], что это происходит под действием электродинамических сил.

При конденсаторной сварке сопротивлением ряда других разнородных металлов наблюдается резкое отличие состава расплавленного металла от состава свариваемых металлов, что объясняется образованием новых сплавов. Это, например, четко видно на структуре участка расплавленного металла сварного соединения твердого сплава (сормайт) и коррозионно-стойкой стали 12Х18Н9Т (рис. 46, е).

Точечная и рельефная конденсаторная сварка таких резко отличающихся по своим свойствам разнородных металлов, как вольфрам и никель, а также вольфрам и платинит (рис. 46, з, д), происходит за счет расплавления никеля и платинита. При этом, например, при сварке вольфрама с никелем наблюдается диффузионное проникновение никеля в вольфрам на глубину до 20 мкм и вольфрама в никель — на глубину до 100 мкм [215]. Из-за высокой пластичности интерметаллидной прослойки в зоне контактирования указанных металлов прочностные характеристики соединения достаточно высоки [90].

При точечной сварке пакетов из разнородных металлов формирование соединений на разнородных участках может проходить в жидком и твердом состояниях одновременно. Так, при сварке двух пластин из алюминированного железа¹ (AlFe) с платинитом в контакте двух листов наблюдается образование литого ядра (рис. 46, е), а соединение проволоки из платинита с алюминированным железом происходит в результате последовательного выдавливания расплавленных покрытий (меди на платините и алюминия на AlFe), сближения под действием усилия сжатия F_z очищенных и нагретых поверхностей и образования металлических связей.

Рельефная конденсаторная сварка разнородных металлов и сплавов с различными покрытиями на них осуществляется (как и в случае, указанном выше, см. рис. 46, е) в результате расплавления и выдавливания металла покрытия. В этом случае, например, при сварке серебряной меди с никелем (рис. 46, ж) и золоченого кобальта с никелем (рис. 46, з, и) отдельные мелкие гребешки одного металла проникают в другой и образуется прочное соединение.

Аналогично этому формируется соединение при Т-образной сварке (рис. 45, у). А при сварке с малыми усилиями сжатия F_z жидкий металл, как уже указывалось, полностью не выдавливается из зоны соединения (рис. 46, к).

Особое место при изготовлении различных изделий приборостроения и радиоэлектроники занимает точечная и рельефная конденсаторная сварка контактных узлов — контактодержателей из различных металлов и сплавов с контактами из серебра, золота, платины, палладия и их сплавов [22, 28]. Соединение указанных металлов происходит с образованием литого ядра (см. рис. 45, ф), эвтектики, прослоек ограниченных твердых растворов и в твердом состоянии (см. рис. 46, л). При сварке контактодержателя из латуни Л63 с контактом из сереб-

¹ Основной слой этого материала — железо армо с двусторонним алюминиевым покрытием, между алюминием и железом расположен слой Al_3Fe_2 .

ра наблюдается образование эвтектики Ag — Cu — Zn, содержащей 55 % Ag, 15 % Cu и 30 % Zn, с температурой плавления 675 °C [80, 117].

Образование ограниченных твердых растворов при сварке других контактных узлов может также происходить в результате плавления контактодержателей и взаимодействия жидкого и твердого металлов в контакте деталь — деталь. Однако такие твердые растворы могут также появляться и между эвтектической прослойкой и основным металлом.

В особых случаях конденсаторной сварки разнородных металлов, например при сварке медных проводов (одножильных и многожильных, в том числе в изоляции), армированных металлической трубкой, с конструктивными элементами из различных металлов, соединения в большинстве случаев формируются в твердом состоянии (рис. 46, *ж, н*).

ТЕХНОЛОГИЯ ТОЧЕЧНОЙ И РЕЛЬЕФНОЙ КОНДЕНСАТОРНОЙ СВАРКИ

1. Основные характеристики сварных соединений

Технологические преимущества конденсаторной сварки способствовали ее широкому применению, прежде всего в приборостроении и радиоэлектронике, т. е. в области микросоединений. Важно отметить, что конденсаторная сварка явилась тем способом, который обеспечил высокое качество этих соединений и удовлетворил ряд повышенных требований к ним [42, 137, 197].

Специфическими особенностями выполнения микросоединений являются следующие: большой диапазон толщин и сечений (от долей микрометра до нескольких миллиметров); широкая номенклатура марок и наименований металлов и сплавов, из которых выполняются детали и узлы; значительное различие соединяемых деталей по толщине, диаметру, конфигурации и теплофизическим свойствам; ограниченность доступа к месту выполнения соединения; малые размеры соединяемых деталей и узлов, что обуславливает при их сборке использование в ряде случаев оптических устройств; сохранение при выполнении соединений высокой точности (до нескольких микрометров) размеров, баз, отверстий; сложная конфигурация деталей и узлов; обеспечение хорошего внешнего вида соединений, деталей и узлов; необходимость выполнения соединений вблизи спая металла с изолирующим материалом (стеклом, керамикой и др.) и края деталей; получение надежного, малого и стабильного по величине переходного сопротивления контакта деталь — деталь; обеспечение высокой надежности и прочности соединений при статических и вибрационных нагрузках, ударах, больших ускорениях, низкой и повышенной температуре и влажности и др.; отсутствие поверхностных загрязнений деталей и узлов приборов; недопустимость местного отслоения покрытий деталей и узлов; обеспечение высокой химической устойчивости соединения против воздействия реагентов, находящихся с ним в соприкосновении.

В определенной мере некоторые из указанных особенностей относятся и к получению неразъемных соединений из металлов толщиной 0,8—3 мм.

Соединения, выполняемые способами точечной и рельефной конденсаторной сварки, характеризуются следующими показателями [40, 42]: прочностью, определяемой размерами зоны и свойствами

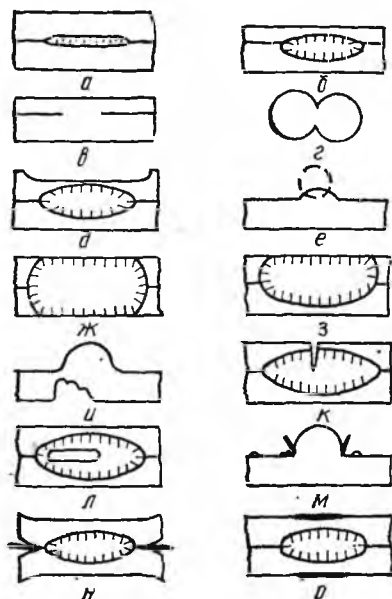


Рис. 47. Дефекты точечных и рельефно-точечных сварных соединений:

а — малая глубина проплавления; б — смещение литой зоны; в, г — малая зона соединения; д, е — большая деформация деталей; ж, з — сквозное проплавление; и — прожог; к — трещина; л — поря; м, н — выплески; о — следы меди на поверхности деталей.

ядра¹ (диаметр, высота) сварной точки, а также зоны термического влияния; расположением ядра точки относительно плоскости раздела деталей; глубиной вмятины на последних от электродов на деталях; размерами и расположением дефектов типа несплошностей (пор, раковин, трещин, рыхлостей, посторонних включений и др.) в ядре точки и зоне термического влияния; наличием на поверхности свариваемых деталей застывших частиц металла, образующихся в результате выплеска расплавленного металла; следами электродного материала на поверхности деталей (в контактах электроды — детали); состоянием покрытий на поверхностях деталей после сварки; электропроводностью точек в условиях эксплуатации сварных соединений; наличием на поверхности деталей таких дефектов, как оксиды, нагары, трещины, прожоги и др.; надежностью.

Различные дефекты соединений при точечной и рельефной конденсаторной сварке показаны на рис. 47.

Требования к качеству сварных соединений в основном зависят от условий эксплуатации.

Наши исследования [137, 142, 165], а также опыт других авторов [78, 228] показали, что при выполнении точечных и рельефных соединений способом конденсаторной сварки сопротивлением обеспечивается высокая статическая прочность (рис. 48). При этом диаметр d_n сварной точки (рис. 49), симметрично расположенной относительно плоскости раздела деталей, составлял не менее $(2,5-5) \delta$ [137, 142, 228], а величина проплавления (отношение глубины литой зоны в данной детали к ее толщине) — $0,4-0,7$ [78, 137, 142, 228].

Следует подчеркнуть, что при сварке изделий радиоэлектроники и точного приборостроения из металлов малых толщин и сечений (микросварка) в большинстве случаев высокая прочность не требуется, так как она всегда значительно превышает статическое усилие $F_{нд}$.

¹ В основном анализируются точечные и рельефно-точечные сварные соединения (в обоих случаях образуются сварные точки). При сварке в твердом состоянии размеры зоны точечного соединения также можно с достаточной степенью точности характеризовать, как и ядро литого металла при сварке в жидком состоянии (т. е. условными размерами диаметра и высоты зоны максимального нагрева металла в сварном соединении).

² Нижний предел этой величины может быть выбран и меньшим, однако в этом случае не обеспечивается стабильность прочностных характеристик.

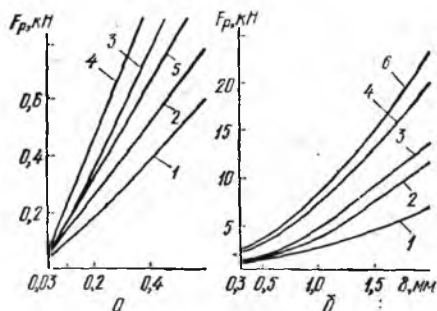


Рис. 48. Зависимость среднего разрывного усилия F_p на точку от толщины при точечной сварке на конденсаторных машинах малой (а), средней и большой (б) мощности:

1 — алюминиевый сплав Д16Т; 2 — латунь Л63; 3 — сталь 08 кп; 4 — сталь 12Х18Н10Т; 5 — бронза БрОФ6,5-0,4; 6 — титановый сплав ОТ4.

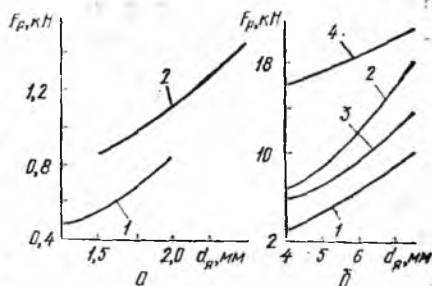


Рис. 49. Зависимость среднего разрывного усилия F_p на точку от диаметра ядра d_n при точечной сварке металла толщиной $\delta = 0,5 + 0,5$ мм на конденсаторных машинах малой (а) и толщиной $\delta = 1,5 + 1,5$ мм на конденсаторных машинах средней и большой (б) мощности [228]:

1 — латунь Л63; 2 — сталь 12Х18Н10Т; 3 — сталь 08 кп; 4 — титановый сплав ОТ4.

недопустимо деформирующее сварной узел (табл. 12). Поэтому при конденсаторной микросварке статическую прочность и размеры сварной точки в большинстве случаев выбирают, исходя из конкретных требований и условий.

Вибропрочность изделий и узлов с микросварными соединениями определяют временем, в течение которого эти соединения противостоят разрушению при воздействии вибрации с частотой и максимальным ускорением, соответствующими эксплуатационным условиям изделия. Вибропрочность точек при конденсаторной микросварке весьма высока, что обусловлено в первую очередь значительной статической прочностью соединений и обычно небольшой их массой.

Выносливость микросварных соединений определяют при воздействии на них знакопеременных нагрузок (составляющих 0,1—0,5 статического усилия на разрыв) определенной частоты, фиксируя при этом среднее число выдержанных соединением циклов кручения или изгибов на заданный угол.

Важным показателем прочности точечных и рельефных микросварных соединений является их пластичность (отношение прочности на отрыв к прочности на срез сварной точки). Наши исследования [135, 137, 142] показали, что величина этого отношения составляет в большинстве случаев не менее 0,4—0,5, что вполне достаточно для самых тяжелых условий работы этих соединений.

Для точечных и рельефных сварных соединений, выполняемых на конденсаторных машинах средней и большой мощности, т. е. для сварных конструкций из металлов толщиной 0,8—3 мм, важными прочностными показателями в ряде случаев (самолеты, суда, автомобили и др.) являются статическая выносливость и усталостная прочность [78, 228]. Указанные показатели зависят в основном от конструктивных форм, жесткости соединяемых элементов и мало

Таблица 12. Значения коэффициента запаса статической прочности k_p

Деталь сварного узла	Свариваемый металл	Толщина δ (или диаметр d), мм	Число сварных точек в узле	Прочность, Н		
				F_p	$F_{н.д}$	$k_p = \frac{F_p}{F_{н.д}}$
Оправа и угольник фотоаппарата «Киев»	Алюминий А97	$\delta_1 = 1;$ $\delta_2 = 0,6$	2	340	65	5,2
Пружинные элементы радиоприбора	Бронза БрОФ 6,5-0,4	$\delta = 0,2$	2	300	20	15
Оправа зеркала оптического прибора	Латунь Л63	$\delta = 0,5$	4	550	80	6,9
Фасонные и пружинные шайбы измерительного прибора	Латунь Л63 и бронза БрОФ 6,5-0,4	$\delta_1 = 0,5;$ $\delta_2 = 0,25$	1	300	20	15
Детали электронно-оптической системы кинескопа	Никель НП2 и платинит	$\delta = 0,15;$ $d = 0,4$	1	62	20	3,1
То же	Сталь 08Х18Н10 и платинит	$\delta = 0,15;$ $d = 0,5$	1	105	25	4,2
Детали электровакуумного прибора	Алюминированное железо и платинит	$\delta = 0,13;$ $d = 0,6$	1	64	20	3,2
Контакт с контактодержателем	Серебро и бронза БрОФ 6,5-0,15	$d = 2,5;$ $\delta = 0,25$	1	400	10	40,0
Вывод и пленка на керамике интегральной схемы	Ковар И29К18 и никель	$\delta = 0,12;$ $\delta = 0,01$	1	17	3	5,6

Примечание. Значения усилия $F_{н.д}$ соответствуют такому состоянию сварных узлов, при котором они в результате недопустимых деформаций становятся неработоспособными.

зависят от диаметра ядра точки [78, 175, 228]. Поэтому испытания на статическую выносливость и усталость проводят обычно при отработке элементов сварных конструкций. Дефекты сварных соединений типа несплошностей, расположенные вблизи зоны термического влияния, резко снижают их динамическую прочность [78, 175, 228].

Во многих случаях при точечной и рельефной конденсаторной сварке (но в основном при микросварке) необходимо выполнять эти процессы без образования выплесков жидкого металла [40—42, 60, 85, 86, 132, 135, 143], которые нередко обуславливают выход изделия из строя.

Часто недопустимыми дефектами на поверхности деталей являются следы электродного материала, оксиды, нагары, а также нарушение сплошности покрытий. Эти дефекты могут обусловить снижение срока службы, коррозионной стойкости, изменение рабочих па-

раметров изделия и пр. Современное оборудование для конденсаторной микросварки позволяет в большинстве случаев получать сварные соединения без указанных дефектов, что значительно расширило области применения этого способа. Безусловно, что и при конденсаторной сварке на машинах средней и большой мощности данные дефекты могут быть значительно снижены (по сравнению со сваркой на других контактных машинах с большими значениями $t_{св}$).

Одной из характеристик токонесущих и в первую очередь микросварных соединений является их электропроводность, т. е. величина электрического сопротивления зоны соединений. Многолетний опыт внедрения конденсаторной сварки и экспериментальные исследования свидетельствуют о высокой электропроводности точечных и рельефных микросварных соединений (табл. 13).

Важной характеристикой качества микросварного соединения является его надежность. Время безотказной работы точечных и рельефных соединений подчиняется в большинстве случаев показательному закону распределения. Количественно оценить надежность сварных соединений позволяет такой параметр, как интенсивность отказов¹ [122]. Микросварные соединения испытывают на надежность в нормальных условиях, а также при циклическом воздействии повышенной влажности, пониженной и повышенной температуры. Можно также отметить, что весьма высокое качество микросварных соединений, выполненных конденсаторной сваркой, подтверждается довольно низкими средними значениями интенсивности отказов ($10^{-7} - 10^{-9}$ 1/ч) [122].

2. Рациональные циклы сварки

Как и при любом другом способе контактной сварки сопротивлением [52, 175], точечная и рельефная конденсаторная сварка должна начинаться с предварительного сжатия между электродами машины свариваемых деталей с целью обеспечения хорошего электрического контакта как между этими деталями, так и каждой из них с соответствующей контактной поверхностью рабочей части примыкающего к ней электрода.

Если при включении сварочного (или подогревного) тока усилие сжатия недостаточно (рис. 50, а), то при прочих равных условиях контактные сопротивления деталь — деталь ($R_{длх}$) и электрод — деталь

Таблица 13. Средние значения сопротивления зоны неразъемных соединений из латуни Л63, мкОм

Соединения	В нормальных условиях	После 48 ч пребывания в камере
Сварные	225,2	227,6
Паяные	233,6	244,1

Примечания: 1. Толщина латуни 0,5+0,6 мм. 2. Исследованию подвергались патроны к сигнальным электрическим лампам. 3. Относительная влажность в камере 98 %.

¹ Показывает, какая доля работающих в момент времени t сварных соединений выходит из строя в единицу времени (после момента t).

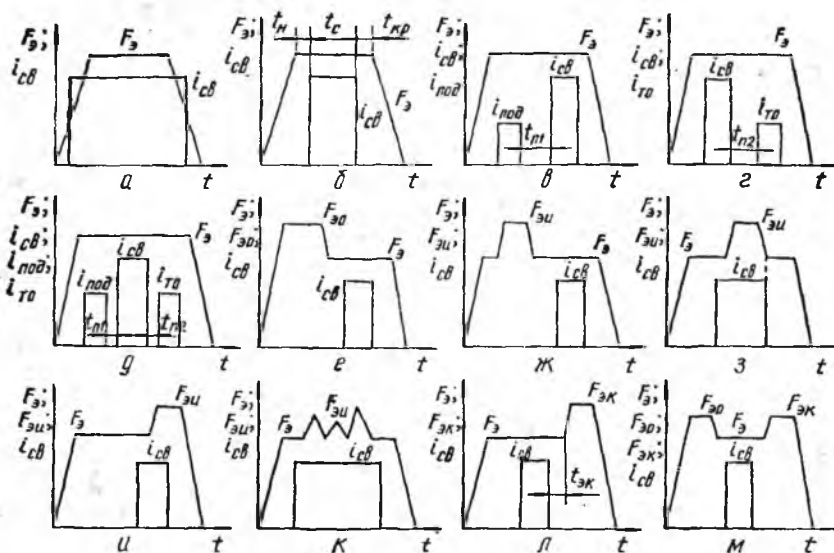


Рис. 50. Различные термомеханические циклы при точечной и рельефной конденсаторной сварке.

($R_{в1д1х}$ и $R_{в2д2х}$) получаются довольно значительными и на них почти мгновенно выделяется недопустимо большое количество тепла, происходит очень быстрое плавление поверхностных слоев свариваемого металла (а иногда и материала электродов) и его выбрасывание из зоны сварки в виде мелких расплавленных частиц. При этом усилия сжатия также возможны прожоги свариваемых деталей и подгорание концов рабочих частей электродов.

Недостаточность усилия сжатия на заключительной стадии нагрева деталей сварочным током (см. рис. 50, а) также недопустима, так как это обуславливает образование внутреннего конечного выплеска, а кроме того, при малых F_0 в сварных соединениях образуются дефекты усадочного характера [52] и происходит подгорание электродов (ввиду увеличения при малых F_0 контактных сопротивлений электроды — детали).

Простейший цикл сжатие — сварочный ток при точечной и рельефной конденсаторной сварке (рис. 50, б) предусматривает включение тока $i_{св}$ только после того, как усилие сжатия F_0 уже приложено (в течение времени начального сжатия деталей t_n). Что касается момента снятия усилия сжатия ($F_0 = 0$), то оно должно запаздывать относительно выключения сварочного тока ($i_{св} = 0$) на время $t_{кр}$, которое необходимо для охлаждения зоны соединения (например, при сварке в жидком состоянии до температуры завершения кристаллизации расплавленного металла в ядре сварной точки).

Если в простейшем цикле сварки усилие сжатия F_0 остается неизменным по величине в течение всего процесса сварки, то в более сложных циклах оно может как повышаться (на стадиях сжатия,

сварки и проковки свариваемых деталей), так и уменьшаться (при сварке).

Простейший цикл точечной и рельефной конденсаторной сварки характерен также и тем, что через зону сварного соединения пропускается только ток $i_{св}$. Однако в ряде случаев при конденсаторной сварке необходима предварительная обработка сжатых между электродами холодных деталей током подогрева $i_{под}$, меньшим по величине, чем ток $i_{св}$ (рис. 50, *в*).

При постоянном $F_в$ выполняются и такие циклы точечной и рельефной конденсаторной сварки, как обработка уже нагретой зоны сварки током термообработки $i_{то}$ (рис. 50, *г*) и обработка деталей сначала током $i_{под}$, а затем токами $i_{св}$ и $i_{то}$ (рис. 52, *б*).

Прохождение через свариваемые детали тока подогрева $i_{под}$ обеспечивает стабилизацию контактных сопротивлений $R_{дд}$, $R_{вд1}$ и $R_{вд2}$, а тока термообработки $i_{то}$ — повышение прочности и пластичности в основном при сварке закаливающих сталей.

Сварка деталей с предварительным подогревом может выполняться при паузе (см. рис. 50, *в*, *б*) между токами $i_{под}$ и $i_{св}$ — $t_{п1} \geq 0$ (что определяется диапазоном разброса значений сопротивлений $r_{дд}$, $r_{вд1}$ и $r_{вд2}$ после подогрева, а также технологическими возможностями машин), а сварка деталей с термообработкой — при паузе $t_{п2}$ (см. рис. 50, *г*, *б*) между токами $i_{св}$ и $i_{то}$, достаточной для фиксации структуры закалки при температуре начала мартенситного превращения. Время $t_{п1}$ и $t_{п2}$ определяется на основе экспериментальных исследований.

При сварке деталей с большим диапазоном разброса контактных сопротивлений и повышенной жесткостью целесообразно их предварительное (до начала прохождения токов $i_{под}$ и $i_{св}$) обжатие усилием $F_{во}$ (рис. 50, *е*), причем приложение $F_{во}$ может быть и импульсным [39] (рис. 50, *ж*). Для предотвращения раковин, пор, рыхлостей, конечного выплеска и трещин импульсное усилие $F_{ви}$ (рис. 50, *з*) накладывают на статическое усилие $F_в$ в процессе прохождения тока $i_{св}$, а снимают в момент окончания (рис. 50, *з*) или после прохождения (рис. 50, *и*) этого тока. Импульсное усилие $F_{ви}$ можно применять и по заданной программе (рис. 50, *к*).

С увеличением толщины деталей для уменьшения общей деформации, снижения остаточных напряжений, повышения усталостной прочности, предотвращения трещин, раковин и рыхлостей рекомендуется использовать ковочное усилие $F_{вк}$ (рис. 50, *л*, *м*), которое обычно в 2—3 раза превышает $F_в$ и прикладывается через несколько миллисекунд после выключения (время $t_{ок}$) тока $i_{св}$.

Практически во всех серийных машинах для точечной и рельефной конденсаторной микросварки применяется неизменное усилие сжатия $F_в$ в течение всего цикла сварки (см. рис. 50, *а—д*).

При точечной и рельефной конденсаторной сварке металлов толщиной 0,8—2,5 мм применяются в основном циклы с постоянным усилием $F_в$ (см. рис. 50, *а—г*), а также с ковочным усилием $F_{вк}$ (см. рис. 50, *л*, *м*).

3. Регулирование электрических параметров сварки, подогрева и термообработки

К электрическим параметрам режимов точечной и рельефной конденсаторной сварки относятся сварочный ток и время сварки.

Сварочный ток характеризуется следующими значениями (рис. 51): амплитудой $I_{\text{свmax}}$, которая достигается на участке от начала разряда конденсаторов до точки *A* на кривой $I_{\text{св}} = f(t_{\text{св}})$; рядом мгновенных значений $i_{\text{св1}}$, $i_{\text{св2}}$, $i_{\text{св3}}$ и т. д. (точки 1, 2, 3, 4 и любые другие на этой же кривой); двумя нулевыми значениями на кривой $i_{\text{св}}$ в начале разряда конденсаторов в точке 0 ($t = 0$) и в конце — в точке *B* ($t = t_{\text{св}}$).

Очень важной характеристикой кривой сварочного тока конденсаторных машин является скорость его нарастания от начала разряда конденсаторов до амплитудного значения $I_{\text{свmax}}$, которая определяется положительной величиной $di_{\text{св}}/dt_{\text{св}}$ и характеризуется углом α_1 , образуемым касательной, например, в данной точке 2 с осью абсцисс. Поэтому принято считать, что у кривой $i_{\text{св}}$ тем круче передний фронт, чем больше угол α_1 , и наоборот, при малых значениях последнего аналогичная кривая II характеризуется существенной пологостью переднего фронта ($\alpha_2 < \alpha_1$).

Время сварки $t_{\text{св}}$ в конденсаторных машинах в принципе является тем отрезком времени, в течение которого конденсаторы разряжаются, причем в случае колебательного разряда (см. рис. 11, а) сюда входит и время обратной полуволны. Однако практически на всех маломощных точечных и рельефных конденсаторных машинах имеет место аperiодический разряд конденсаторов и сварка производится униполярными импульсами сварочного тока [137, 142], что видно из рис. 52.

В целом время $t_{\text{св}}$ состоит из следующих составляющих (см. рис. 51):

$$t_{\text{св}} = t_a + t_0, \quad (\text{V.1})$$

где t_a — время, в течение которого сварочный ток достигает своего амплитудного значения $I_{\text{свmax}}$ и при этом в зоне сварки довольно интенсивно выделяется значительная доля суммарного тепла $Q_{\text{в.с}}$; t_0 — время, на протяжении которого величина сварочного тока падает от $I_{\text{свmax}}$ до нуля (т. е. при этом $di_{\text{св}}/dt_{\text{св}}$ имеет уже отрицательный знак), однако тепловыделение в зоне сварки продолжается до точки *B*.

Последнее обстоятельство требует некоторых дополнительных объяснений, поскольку в работе [175] ошибочно указано, что при

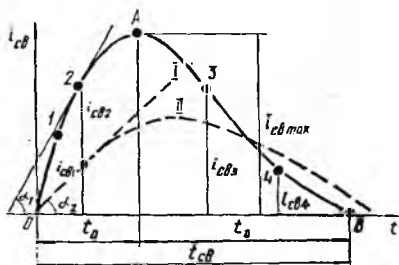


Рис. 51. Зависимость тока $i_{\text{св}}$ от времени t .

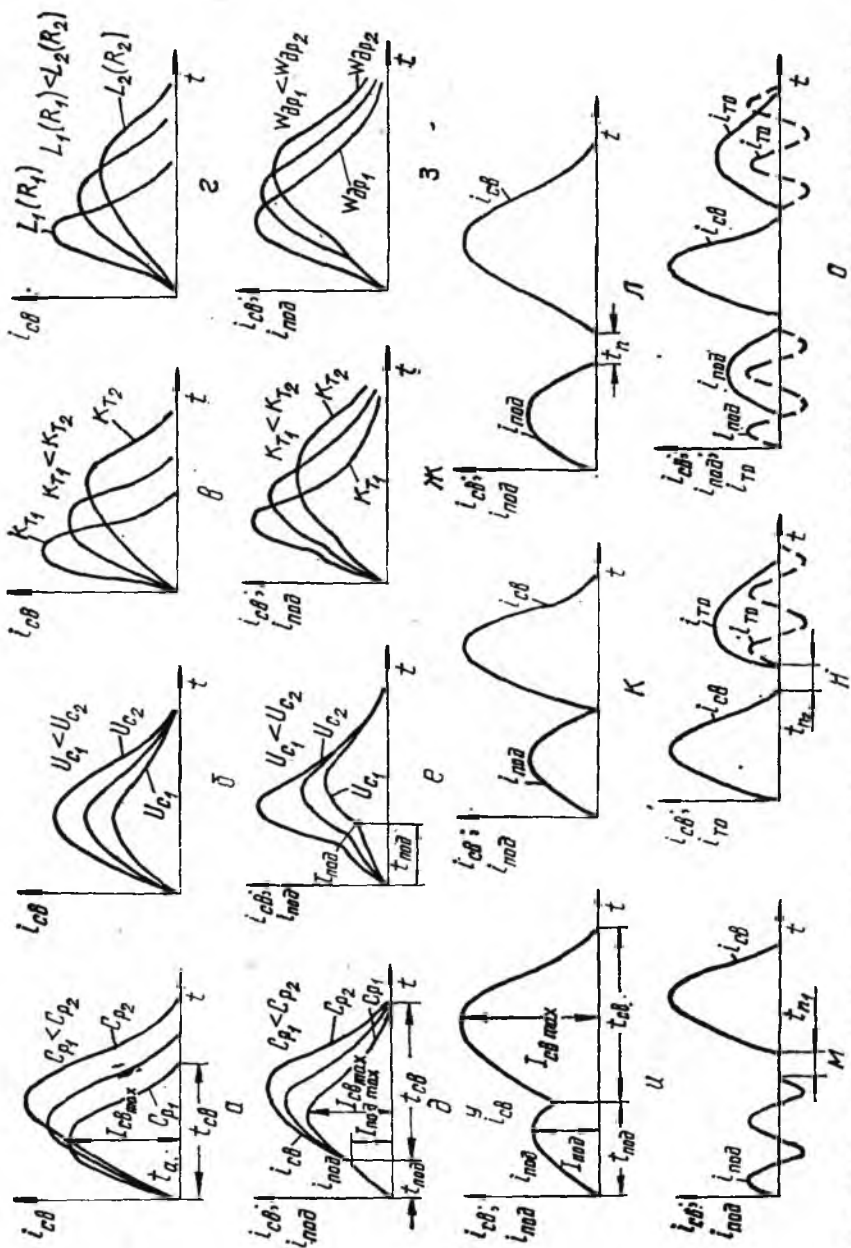


Рис. 52. Различные формы токов подогрева $i_{\text{под}}$ и термообработки $i_{\text{то}}$ при точечной и рельефной конденсаторной сварке.

конденсаторной сварке время $t_{\text{св}}$ принимается равным t_a , с чем нельзя согласиться. Фактически при точечной и рельефной конденсаторной сварке сопротивлением нагрев зоны сварки током $i_{\text{св}}$ происходит в течение всего времени $t_{\text{св}}$, однако он более интенсивен во время t_a , когда теплоотвод в электроды и ЗТВ значительно меньше, чем нагрев зоны сварки, а на участке времени t_0 сначала (вправо от точки А на рис. 51) наблюдается некоторое повышение температуры нагрева, затем он уменьшается, далее уравнивается с потерями тепла и, наконец, последние становятся большими, чем тепловое действие тока (вплоть до $i_{\text{св}} \approx 0$). В течение времени t_a , когда $di_{\text{св}}/dt_{\text{св}}$ растет очень быстро, в зоне сварки выделяется практически все тепло, генерируемое током на контактом сопротивлении деталь — деталь, и чем меньше t_a , тем больше $di_{\text{св}}/dt_{\text{св}}$ и быстрее исчезает это сопротивление. С уменьшением толщины свариваемого металла время $t_{\text{св}}$ значительно сокращается, крутизна переднего фронта кривой $i_{\text{св}}$ возрастает и уменьшается не только время t_a , но и t_0 , однако в этом случае нагрев зоны сварки (в первую очередь при образовании микросварных соединений) во многом определяется временем t_a , когда выделяется все тепло $Q_{\text{дл}}$, а ввиду очень малых значений t_a и t_0 количества тепла $Q_{\text{пл}}$ и $Q_{\text{д2}}$ не могут быть значительными. В общем случае значения $t_{\text{св}}$, а значит, и t_a , t_0 определяются различными параметрами данной сварочной машины и конкретного режима сварки (см. рис. 52).

При конденсаторной сварке сопротивлением ток $i_{\text{св}}$ и время $t_{\text{св}}$ являются функцией ряда следующих параметров: емкости конденсаторов C_p — при ее увеличении максимальная величина тока $i_{\text{св}}$ растет незначительно, но довольно заметно растет время $t_{\text{св}}$ (рис. 52, а); напряжения зарядки конденсаторов U_c — при его увеличении сварочный ток существенно возрастает, а время практически не изменяется (рис. 52, б); коэффициента трансформации сварочного трансформатора k_T (для способов трансформаторной конденсаторной сварки сопротивлением) — при большом коэффициенте, что соответствует уменьшению вторичного напряжения сварочного трансформатора, ток снижается, а время растет (рис. 52, в); индуктивности L и активного сопротивления R сварочной машины и зоны сварки — при увеличении этих параметров ток $i_{\text{св}}$ уменьшается, время $t_{\text{св}}$ возрастает (рис. 52, г).

Необходимо особо отметить, что, поскольку при точечной и рельефной конденсаторной сварке имеет место небольшой диапазон изменения индуктивности L и активного сопротивления R , обычным здесь является регулирование сварочного тока главным образом путем изменения U_c , k_T (и лишь частично C_p), а времени $t_{\text{св}}$ — за счет разных значений C_p , k_T .

Рассматривая в целом такой важный вопрос, как регулирование при точечной и рельефной конденсаторной сварке сопротивлением времени $t_{\text{св}}$, следует в первую очередь отметить, что за последние 12—15 лет во всей области контактной сварки сопротивлением наметилась явная тенденция к уменьшению оптимальных значений $t_{\text{св}}$ (с соответствующим ростом сварочного тока), причем в значительной мере это связано с тем, что опыт широкого внедрения точечной конденсаторной сварки [135, 137, 142] убедительно показал рациональность

Т а б л и ц а 14. Оптимальное время $t_{\text{св}}$, с, при сварке на старых и современных машинах [49, 52, 175, 228]

Свариваемые металлы и их толщина, мм	Старые	Современные
Малолуглеродистая сталь, 3+3	0,6—1,0	0,26
Дуралюмин, 2,5+2,5	0,25	0,14
Коррозионно-стойкая сталь 12Х18Н9Т, 2,5+2,5	0,2—0,3	0,16—0,20
Латунь Л63, 1+1	0,2	0,12

применения довольно малых $t_{\text{св}}$, при которых прочность сварных соединений получается высокой, а потери тепла в ЗТВ и электроды существенно уменьшаются. В настоящее время сравнительно небольшие $t_{\text{св}}$ применяют (кроме конденсаторной сварки) не только на контактных машинах постоянного тока и низкочастотных, но также и на машинах однофазного тока 50 Гц [175, 228].

В качестве примеров в табл. 14 приведены данные об оптимальных значениях $t_{\text{св}}$, которые применялись раньше [49, 52] и используются теперь. Поскольку, в частности, такая мощная точечная конденсаторная машина, как МТК-75, позволяет сваривать различные металлы и сплавы толщиной 2,5 + 2,5 мм, то совершенно ясно, что теперь конденсаторная сварка уже не является, как считалось раньше, процессом с очень жесткими режимами сварки, а эти режимы соответствуют оптимальным.

Поскольку такое положение является уже практически бесспорным, отметим, что именно на конденсаторных машинах сравнительно простыми средствами (см. рис. 52) достигается возможность регулирования в довольно широких пределах таких параметров, как величина сварочного тока и крутизна его нарастания, а также время $t_{\text{св}}$ и его составляющие (t_a и t_o).

Требование регулирования крутизны переднего фронта кривой сварочного тока возникло при конденсаторной микросварке сопротивлением в связи с необходимостью получения сварных соединений без образования выплесков. Так как при изменении различных параметров этого способа сварки (см. рис. 52, а—г) крутизна тока получается довольно значительной, появились разные технические решения — направленные на ее сглаживание. Сравнительно простым является последовательное включение в разрядную цепь конденсатора насыщающегося дросселя с регулируемым числом витков $w_{\text{др}}$ (см. рис. 37, и), что позволяет не только уменьшить крутизну переднего фронта тока, но и получить при этом регулируемый термический цикл подогрев — сварка. Анализ показывает, что при использовании этого дросселя токи подогрева $i_{\text{под}}$ и сварки $i_{\text{св}}$, время подогрева $t_{\text{под}}$ и время t_a (достижения током $i_{\text{св}}$ своего максимального значения) являются функцией следующих установочных¹ параметров

¹ Установочными параметрами режима точечной и рельефной конденсаторной сварки являются те, которые могут быть установлены в данной сварочной машине благодаря имеющимся в ней регулировочным устройствам.

режима сварки: емкости конденсаторов C_p — при увеличении C_p возрастают $i_{св}$ и t_a , а $i_{под}$, $t_{под}$ и $t_{св}$ почти не изменяются (см. рис. 52, *д*); напряжения зарядки U_c — при увеличении U_c растут значения $i_{св}$, $i_{под}$, но уменьшаются t_a и $t_{под}$ (рис. 52, *е*); коэффициента трансформации k_t (определяемого отношением количества витков первичной обмотки от ее конца до точки подключения дросселя к числу витков вторичной обмотки сварочного трансформатора) — при увеличении k_t уменьшаются $i_{св}$ и $i_{под}$, а t_a и $t_{под}$ возрастают (рис. 52, *ж*); количества витков дросселя насыщения $w_{др}$ — при увеличении $w_{др}$ возрастают $i_{под}$, $t_{под}$ и t_a , а $i_{св}$ — уменьшается (рис. 52, *з*).

Влияние индуктивности L и активного сопротивления R сварочной машины и зоны сварки на изменение параметров импульса тока сварки аналогично процессу при обычном разряде конденсаторов C_p (см. рис. 52, *г*).

Значительно большие технологические возможности имеют конденсаторные машины с двумя¹ (рис. 52, *и—л, н*) и аналогично с тремя батареями рабочих конденсаторов C_p (рис. 52, *о*), заряжаемых до одинаковых или разных уровней напряжений $U_{сг}$. В последнем случае (рис. 52, *о*) разряд первой батареи конденсаторов C_{p1} обеспечивает подогрев зоны сварки, второй C_{p2} — сварку деталей, а третьей C_{p3} — термообработку этой зоны.

В зависимости от конкретных технологических задач процесс может выполняться с наложением импульса сварочного тока $i_{св}$ на импульс тока подогрева $i_{под}$ (см. рис. 52, *у*), с нулевой или регулируемой паузой между токами $i_{под}$ и $i_{св}$ (см. рис. 52, *к, л*), а также с нулевой и регулируемой паузой между токами $i_{св}$ и $i_{то}$ (см. рис. 52, *н, о*). Регулирование здесь параметров каждого из импульсов токов $i_{под}$, $i_{св}$, $i_{то}$ осуществляется за счет изменения C_p , U_c и k_t (см. рис. 52, *а—г*), а пауза между импульсами или момент наложения одного импульса на другой — специальным реле времени.

В ряде случаев подогрев и термообработка свариваемых деталей могут осуществляться переменным током (см. рис. 52, *м—о*). Регулирование параметров токов $i_{под}$ и $i_{то}$ в этом случае осуществляется изменением числа периодов или полупериодов переменного тока, а также фазовым методом [179].

Регулирование электрических параметров токов $i_{св}$, $i_{под}$ и $i_{то}$ может осуществляться и некоторыми другими техническими средствами [45, 46, 83, 96, 137, 167, 179], однако конденсаторные машины, в которых обеспечивается такое регулирование, не нашли применения в промышленности и поэтому здесь не рассматриваются.

4. Влияние основных параметров процесса на качество сварных соединений

При точечной и рельефной конденсаторной сварке, так же как и при контактной сварке [49, 52], режимы сварки определяются следующими параметрами: сварочным током $I_{св}$;

¹ Впервые такая возможность была показана в работе [137].

временем сварки $t_{\text{св}}$; усилием сжатия свариваемых деталей F_0 и диаметром контактной поверхности электрода d_0 и его материалом.

Анализ показывает, что при точечной и рельефной конденсаторной микросварке сопротивлением существует обычная для контактной сварки сложная зависимость между физическими свойствами, толщиной, размерами точек свариваемых металлических деталей и основными параметрами режима сварки. Однако качество и стабильность соединений, а иногда и возможность их получения с заданными параметрами качества во многом определяются величиной и ролью в тепловом балансе зоны сварки количества тепла, выделяемого на каждом из контактных сопротивлений деталь — деталь и электроды — детали. Поэтому при разработке режимов точечной и рельефной конденсаторной микросварки и анализе влияния их параметров на качество соединений необходимо учитывать следующие важные положения: 1) поскольку с уменьшением толщины свариваемого металла необходимые значения усилий сжатия F_0 существенно снижаются, а сопротивления $R_{\text{длх}}$, $R_{\text{эл1дх}}$ и $R_{\text{эл2дх}}$ возрастают, одновременно должны выпасть требования к стабильности этих усилий и состоянию поверхностей свариваемых деталей, а подготовка контактных поверхностей и установка рабочих частей электродов по отношению к поверхностям деталей должны выполняться тем тщательнее, чем в большей мере количество тепла $Q_{\text{эл1д1}}$ и $Q_{\text{эл2д2}}$ влияет на тепловой баланс зоны сварки, а значит, и на качество микросварных соединений; 2) ввиду того, что при $\delta = \text{const}$ собственные начальные сопротивления свариваемых деталей $R_{\text{д1х}}$ и $R_{\text{д2х}}$ зависят от усилия F_0 и диаметра d_0 , получение стабильных точечных микросварных соединений должно обеспечиваться строгим постоянством значений F_0 и d_0 .

Режим точечной и рельефной сварки может быть подобран в основном путем регулирования следующих установочных параметров: рабочей емкости конденсаторов C_p ; напряжения зарядки конденсаторов U_c ; коэффициента трансформации сварочного трансформатора k_T (при трансформаторной сварке); формы, материала и размеров контактной поверхности электродов; усилия сжатия свариваемых деталей F_0 ; полярности сварки.

Влияние емкости конденсаторов и напряжения их зарядки. Регулирование значений энергии W_k при конденсаторной сварке может производиться изменением как емкости конденсаторов C_p , так и напряжения их зарядки U_c . Однако следует учитывать, что часто одинаковый тепловой эффект в зоне нагрева от разряда конденсаторов можно получить при многих значениях энергии W_k , которые в свою очередь получают подбором ряда значений C_p и U_c . Так, возможно получение равнопрочных сварных точек на одних и тех же толщинах металлов при таких условиях: большой емкости конденсаторов и высоком напряжении их зарядки, однако при этом должно быть приложено большое усилие сжатия; меньшей емкости конденсаторов и более низком напряжении их зарядки, но при меньшем усилии сжатия. Это объясняется тем, что в первом из указанных случаев росту квадрата тока $I_{\text{св}}^2$ и времени $t_{\text{св}}$ соответствует уменьшение значений всех составляющих сопротивления $R_{\text{в.сх}}$ при большом усилии

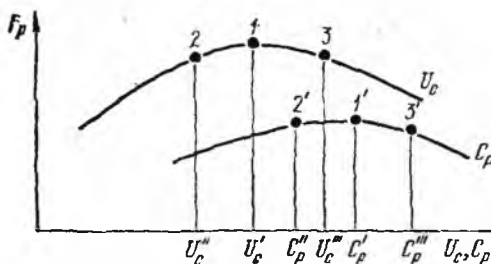


Рис. 53. Принципиальная зависимость разрывного усилия F_p на точку от напряжения зарядки конденсаторов U_c и их емкости C_p .

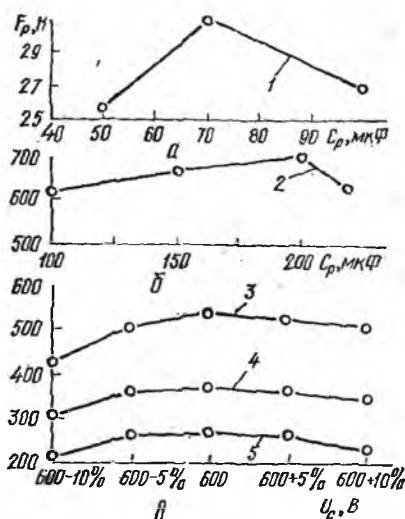


Рис. 54. Зависимость среднего разрывного усилия F_p на точку от емкости C_p (а, б) и от напряжения зарядки U_c (в) при точечной конденсаторной микросварке (1 — латунь Л63, $\delta = 0,05 + 0,05$ мм; 2 — сталь Ст10, $\delta = 0,3 + 0,3$ мм; 3 — бронза БрОФ6,5-0,4, $\delta = 0,35 + 0,35$ мм; 4 — сталь Ст 10, $\delta = 0,2 + 0,2$ мм; 5 — латунь Л63, $\delta = 0,2 + 0,2$ мм).

сжатия, а во втором — снижение значений $I_{св}^2$ и $t_{св}$ компенсируется увеличением этих же сопротивлений при меньшем усилии сжатия.

Однако оптимальным режимом любого способа конденсаторной сварки следует считать такой, при котором прочное и качественное по другим показателям сварное соединение получается благодаря использованию возможно меньшей энергии, накопленной в конденсаторах. Это также позволяет конструировать дешевые и компактные конденсаторные машины и экономить расходуемую на зарядку конденсаторов электроэнергию.

Отклонения значений C_p и U_c от оптимальных обуславливают уменьшение прочности сварных соединений (рис. 53), появление выплесков (при увеличении U_c) и непроваров (при снижении U_c и C_p). Здесь оптимальными режимами на кривой U_c является точка 1, а на кривой C_p — точка 1'. Если, например, произойдет понижение напряжения зарядки конденсаторов до значения U_c'' (точка 2 на кривой U_c) или оно повысится до значения U_c''' (точка 3 на этой же кривой), то в обоих случаях прочность сварного соединения на разрыв F_p уменьшается. Такое же явление будет иметь место при изменениях значения емкости конденсаторов (уменьшении до C_p'' — точка 2' на кривой C_p и увеличении до C_p''' — точка 3' на той же кривой).

Снижение прочности сварных соединений при отклонениях значений U_c и C_p от их оптимальных значений (рис. 54) объясняется следующими причинами: при понижении U_c и C_p в зоне сварки расплавляется несколько меньший объем металла; при повышении U_c и C_p в основном имеет место перегрев свариваемого металла в зоне сварки.

Практика внедрения точечной и рельефной конденсаторной сварки металлов малых толщин показала, что колебания напряжения за-

рядки конденсаторов до $\pm 2\%$ (при всех прочих равных условиях) вызывают незначительное снижение прочности сварных точек, которое, как правило, при отсутствии выплесков допустимо даже для сварки ответственных изделий. Однако в случае действия при отклонениях $\Delta U_c = \pm 2\%$ таких возмущающих факторов, как ухудшение качества подготовки деталей перед сваркой, уменьшение площади контактов электрод — деталь и толщины (диаметра) деталей, увеличение их твердости и др., вероятность появления выплесков, следов электродного материала и местных подплавлений при конденсаторной микросварке существенно возрастает. Поэтому всегда наиболее рационально производить конденсаторную микросварку при погрешности стабилизации напряжения зарядки конденсаторов, не превышающей $\pm (1-1,5\%)$.

При конденсаторной сварке металлов толщиной 0,5—3,0 мм вполне допустимы отклонения $\Delta U_c = \pm (3-5)\%$ [137, 142, 227—229].

Влияние коэффициента трансформации k_T . Здесь в отличие от регулирования формы кривых сварочного тока изменениями C_p и U_c энергия W_k не изменяется (при заданных C_p и U_c). Поэтому регулирование k_T приводит (см. рис. 52) только к изменениям формы кривой сварочного тока, причем (рис. 55) увеличению амплитуды тока соответствует уменьшение времени, и наоборот, снижение амплитуды влечет за собой рост времени. Регулирование при точечной и рельефной конденсаторной сварке коэффициента трансформации вызывает соответствующие изменения индуктивности всей машины и ее эквивалентного контура.

Благодаря регулированию k_T часто удается подобрать требуемые скорости нагрева тех или иных марок металлов.

При регулировании коэффициента k_T имеет место изменение напряжения во вторичной обмотке этого трансформатора. Величина амплитудного значения этого напряжения

$$U_2 = U_c / k_T. \quad (V.2)$$

Это напряжение благодаря регулированию значений k_T (при $U_c = \text{const}$) может быть подобрано или рассчитано в практически необходимых пределах от $U_{2\min}$ до $U_{2\max}$ (при заданном числе промежуточных его значений).

При регулировании k_T и всех прочих равных условиях наиболее прочные сварные точки обычно получаются при вполне определенном для данного металла и его толщины значении коэффициента трансформации (рис. 56). Причем при увеличении и уменьшении коэффициента k_T прочность сварного соединения снижается, однако во втором

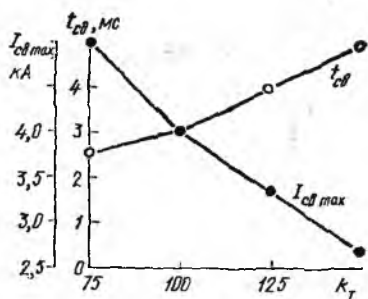


Рис. 55. Зависимость сварочного тока $I_{св\max}$ и времени сварки $t_{св}$ от коэффициента k_T при точечной конденсаторной микросварке алюминия А97 толщиной 0,4 + 0,4 мм.

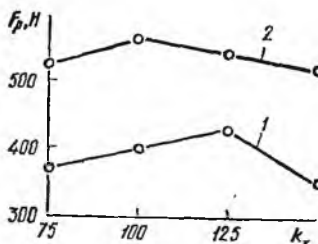


Рис. 56. Зависимость разрывного усилия F_p на точку от коэффициента k_t при конденсаторной микросварке стали 10 толщиной $0,2 + 0,2$ мм (1) и латуни Л63 толщиной $0,5 + 0,5$ мм (2).

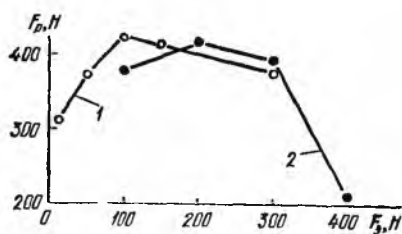


Рис. 57. Зависимость разрывного усилия F_p на точку от усилия F_c при конденсаторной микросварке стали 10 толщиной $0,2 + 0,2$ мм (1) и латуни Л63 толщиной $0,35 + 0,35$ мм (2).

случае наблюдаются также и выплески, подлипания, следы электродного материала на поверхности деталей и проплавление последних.

Коэффициент трансформации ориентировочно следует подбирать с учетом электропроводности свариваемых металлов: чем выше электропроводность, тем меньше должен быть коэффициент трансформации. Однако этим положением следует пользоваться с учетом того, что многие материалы могут быть качественно (без выплесков, следов электродного материала на поверхности свариваемых деталей и др.) сварены только при определенной форме кривой сварочного тока, определяющей скорость нарастания температуры ядра точки и регулируемой изменением не только k_t , но также и других параметров.

Влияние усилия сжатия. При рельефной и точечной конденсаторной сварке сопротивлением усилие сжатия F_c является одним из важнейших параметров и оказывает значительное влияние на ее результаты, поскольку от него зависят сопротивления $R_{плx}$, $R_{пл1x}$, $R_{пл2x}$, $R_{пл1x}$ и $R_{пл2x}$, значениями которых определяются распределение и интенсивность источников тепла при прохождении сварочного тока. Кроме того, усилие сжатия является механическим фактором, определяющим степень пластической деформации в сварном соединении.

При точечной конденсаторной сварке металлов малых толщин с увеличением δ возрастает (в соответствии с теорией) усилие сжатия, при котором получают наиболее прочные сварные точки. Как показали исследования [132, 142] и опыт анадрения, для многих марок цветных и черных металлов толщиной $0,02—0,5$ мм, свариваемых внахлестку на маломощных точечных конденсаторных машинах, достаточны усилия сжатия $5—500$ Н.

На рис. 57 приведены экспериментальные кривые, которые показывают влияние усилия сжатия (при постоянных других параметрах режима сварки) на разрывное усилие точки F_p , которое получается наибольшим при вполне оптимальном (для данной марки и толщины свариваемого металла) значении F_c . С уменьшением этого усилия наблюдаются выплески, подлипания электродов к деталям и следы электродного материала на поверхности деталей, а иногда и прожоги.

Влияние формы и размеров контактной поверхности электродов. Форма и размеры контактной поверхности электродов, а также материал, из которого изготавливаются последние (главным образом их рабочие части), при точечной конденсаторной сварке сопротивлением играют важную роль, и от их правильного выбора часто зависит не только получение доброкачественных соединений, а и возможность осуществления процесса сварки.

Практикой внедрения установлено, что при точечной конденсаторной микросварке следует в основном применять электроды, имеющие цилиндрический рабочий конец и плоскую контактную поверхность.

Изменение размеров и материалов рабочих частей электродов обуславливает непостоянство тепловыделения, а также теплоотвода на участках электроды — детали и деталь — деталь зоны сварки. В связи с этим уменьшение размеров или теплопроводности материала рабочих частей электродов может вызвать не только снижение прочности (из-за сквозного проплавления свариваемых деталей, значительной их деформации и даже прожогов), но и появление выплесков, следов электродного материала на поверхностях деталей, подплавания электродов к последним и др. Увеличение указанных выше параметров электродов также вызывает снижение прочности, поскольку при увеличении диаметра электрода накопленная энергия W_k оказывается недостаточной для получения сварной точки большего диаметра, а при меньшей теплопроводности, например, одного из электродов наблюдается смещение литой зоны в деталь, со стороны которой установлен этот электрод.

Влияние изменения диаметра рабочей части электрода на прочность сварного соединения показано на рис. 28.

Влияние полярности сварки. Выше было указано, что при сварке (в основном разнородных материалов) униполярным импульсом тока изменение выбранной полярности может обусловить смещение зоны максимального нагрева относительно плоскости раздела деталей (эффект Пельтье). Вследствие этого снижается прочность сварного соединения. Влияние изменения полярности на прочность микросварного соединения можно показать на следующем примере. При рельефной конденсаторной микросварке контактодержателей из бронзы БрБНТ1,7 толщиной 0,15 мм и контактов из серебряного сплава ПДСр-40 диаметром 0,8 мм (см. рис. 20) прочность на срез F_p при оптимальной (плюс на контакте) полярности составляла

$$\frac{F_{o \min} \rightarrow F_{o \max}}{F_{p \text{ ср}}} = \frac{(170 + 185)}{175} H,$$

а при обратной полярности $\left(\frac{92 + 120}{108} \right) H$.

Кроме рассмотренных выше основных параметров режима на прочность и качество сварных соединений влияют также другие параметры режима и условия выполнения процесса точечной и рельефной конденсаторной сварки (см. гл. III).

5. Выбор режимов сварки

Режимы точечной и рельефной контактной сварки сопротивлением, в том числе и конденсаторной, во многом определяются следующими свойствами и характеристиками свариваемых металлов: электро- и теплопроводностью, температурой плавления, температуропроводностью, твердостью, чувствительностью к термомеханическому циклу сварки, характером изменения прочности и свойств (интервала кристаллизации, температурного интервала хрупкости, предела текучести, пластичности и др.) при нагреве, состоянием поверхностей перед сваркой (химический состав пленок и их толщина, класс чистоты поверхности), размерами и соотношением толщин деталей, теплофизическими свойствами и стабильностью толщины защитных покрытий, конструкцией деталей, входящих в данный сварной узел и др.

Кроме того, режим сварки микросоединений во многом зависит от требований к прочности сварных точек в конкретном узле данной конструкции; допустимости образования наружных и внутренних выплесков при сварке; требований к внешнему виду соединений (после сварки), размерам и свойствам ЗТВ, электропроводности и надежности сварных точек; конфигурации деталей, возможности доступа электрода к месту выполнения соединения, наличия вблизи места сварки теплочувствительных мест [40, 170], недопустимости нарушения сплошности или местного отслоения покрытий и следов электродного материала на поверхности деталей и др.

Режимы точечной и рельефной конденсаторной сварки непосредственно связаны и с такими параметрами, как форма и размер контактных поверхностей и материал рабочих частей электродов, стабильность усилия F_s , обеспечиваемая механизмом сжатия сварочной машины, инерционность подвижной части механизма сжатия.

Наконец, режимы точечной и рельефной конденсаторной микросварки зависят от роли количества тепла $Q_{\text{ид}}$ и $2Q_{\text{вп}}$ в общем балансе тепловыделения и определяются в основном фактической величиной контактных сопротивлений $R_{\text{дл}}$ и $2R_{\text{эд}}$ и условий выполнения процесса сварки.

В связи с изложенным практически трудно определить, какие именно параметры и условия выполнения точечной и рельефной конденсаторной микросварки окажут наиболее существенное влияние на выбор параметров режима сварки, что не позволяет разработать точную методику расчетного определения этих параметров.

Следует также отметить, что некоторые из указанных выше особенностей усложняют разработку аналогичной методики и для конденсаторной сварки металлов толщиной более 0,8 мм. Именно этим можно объяснить тот факт, что до настоящего времени наиболее достоверным источником в целом по выбору параметров режимов точечной контактной сварки (в том числе и конденсаторной) остаются данные экспериментальных исследований [49, 52, 78, 79, 228].

Практика внедрения точечной и рельефной конденсаторной микросварки показывает, что высокие показатели эффективности данно-

го процесса достигаются там, где выбору режимов сварки в первую очередь предшествовала разработка комплексных требований в целом к качеству соединения, а не только к прочности, поскольку регламентированная прочность микросварного соединения исходя из конкретных условий может быть высокой, средней и низкой (по отношению к прочности основного металла), а поэтому должна выбираться с учетом эксплуатационных требований.

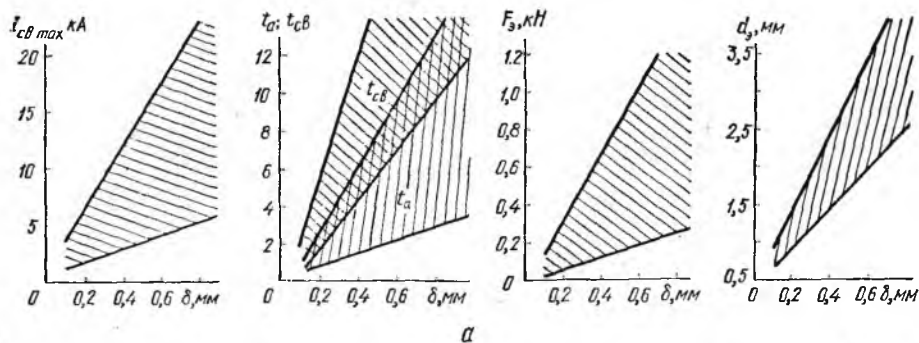
При выполнении сварных соединений из металлов толщиной более 0,8 мм выбор параметров режима должен обеспечивать получение высокой прочности сварных соединений, которая регламентируется их конструктивными размерами в соответствии с ГОСТ 15878—70.

Выбор сварочного тока и формы его кривой. Известно, что от электропроводности свариваемого металла зависит требуемый ток $I_{\text{св}}$, причем чем больше электропроводность (т. е. меньше удельное электросопротивление) данного металла, тем больший ток $I_{\text{св}}$ нужен для выделения требуемого количества тепла $Q_{\text{з.с.}}$. Однако при микросварке довольно существенным генератором тепла при образовании сварного соединения является контактное сопротивление $R_{\text{кл}}$. Чем больше тепло $Q_{\text{кл}}$, тем соответственно меньшей должна быть доля тепла, выделяемая в зоне сварки за счет собственного сопротивления металла свариваемых деталей, а значит, и при соответственно меньшем токе $I_{\text{св}}$ они могут быть сварены. Поэтому сначала необходимо выбрать требуемый ток $I_{\text{св}}$, принимая условно тепловое действие $Q_{\text{кл}}$ равным нулю, а затем на основе экспериментальных исследований и учета графика $k_{\text{вн}} = f(\delta)$ (см. рис. 19, в) определить фактическое влияние на тепловой баланс зоны сварки данного микросоединения тепла $Q_{\text{кл}}$ и соответственно уменьшить расчетное значение сварочного тока.

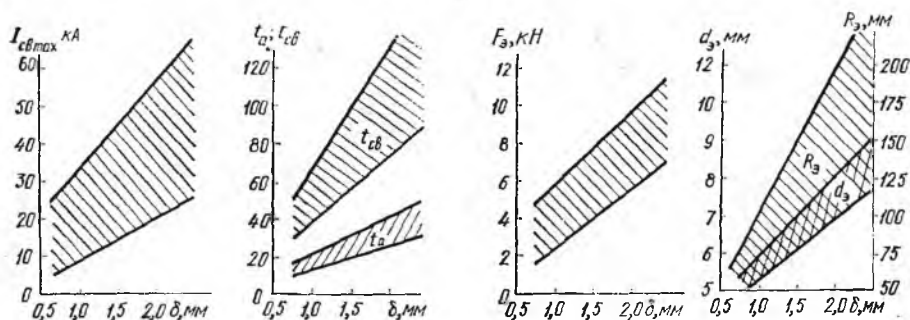
Что касается величины этого тока, то в принципе при точечной и рельефной конденсаторной сварке она может рассчитываться по формуле (II.44). Практически довольно часто измерения и расчеты входящих в эту формулу величин могут оказаться затруднительными, в связи с чем для выбора ориентировочных амплитудных значений тока $I_{\text{св max}}$ при точечной конденсаторной микросварке можно пользоваться экспериментальными зависимостями $I_{\text{св}} = f(\delta)$, приведенными на рис. 58, а (данные рис. 58, б относятся к точечной сварке металлов толщиной 0,8—2,5 мм).

Для медных, алюминиевых и магниевых сплавов в широком диапазоне толщин (0,05—2,5 мм), отличающихся высокой электро- и теплопроводностью, требуются большие токи (рис. 58, верхние прямые). По сравнению с этими сплавами коррозионные, жаропрочные и титановые сплавы сваривают при значительно меньших токах (рис. 58, нижние прямые).

Амплитудные значения сварочного тока при рельефной точечной конденсаторной сварке указанных выше материалов практически мало отличаются от аналогичных значений тока при их точечной сварке, если геометрические размеры рельефа выбраны с учетом получения сварной точки диаметром d_n и высотой h_n , соответствующими размерам точечного соединения. В случае одновременной сварки



а



б

Рис. 58. Зависимости тока $I_{св\max}$, времени t_a и $t_{св}$, усилия сжатия F_s , размеров электродов d_s и R_s от толщины δ при точечной сварке на конденсаторных машинах (t_a , $t_{св}$, мс):

а — малой мощности; б — средней и большой мощности.

нескольких рельефов сварочный ток $I_{св}$ в большинстве случаев увеличивают пропорционально количеству этих рельефов.

При выполнении точечных и рельефных микросварных соединений важна не только величина сварочного тока, но и форма его кривой (см. рис. 52), поскольку это связано с образованием выплесков. Выбор формы кривой $I_{св}$ во многом определяется конфигурацией свариваемых деталей (лист с листом, проволока с проволокой, лист с проволокой), состоянием их поверхностей, фактически применяемым усилием сжатия F_s и др. Поэтому в каждом конкретном случае форма кривой и в первую очередь крутизна переднего фронта этого тока ($di_{св}/dt_{св}$) должны выбираться экспериментально.

Общим правилом является следующее: чем более пологим будет передний фронт $i_{св}$, тем меньше отношение $di_{св}/dt_{св}$, а значит, и вероятность образования выплесков. В серийной точечной конденсаторной машине ТКМ-15 (и в наиболее новой ТКМ-17) форма переднего фронта $i_{св}$ регулируется в широких пределах благодаря использованию дросселя в первичной цепи сварочного трансформатора (см. рис. 37, и).

В машине ССП-3 (см. рис. 36, в) образование выплесков предотвращается благодаря импульсу тока подогрева ($I_{\text{под}} < I_{\text{св}}$), форма и величина которого регулируются в широких пределах и в конкретном случае подбираются экспериментально. Обычно ток подогрева $I_{\text{под}}$ составляет при конденсаторной микросварке (0,3—0,8) $I_{\text{св}}$.

Выбор времени сварки. Время $t_{\text{св}}$ на маломощных серийных конденсаторных машинах ТКМ-7, ТКМ-15, ТКМ-17, ССП-3 и др. может регулироваться в пределах 1—15 мс, что вполне достаточно почти для всех случаев применения таких машин. Это объясняется тем, что столь малое время весьма выгодно для получения микросварных соединений с очень малыми размерами ЗТВ. При необходимости увеличение тепловыделения в зоне сварки легко достигается не за счет роста времени сварки, а благодаря увеличению сварочного тока.

Что касается выбора значения $t_{\text{св}}$ в зависимости от толщины (диаметра) контактных свариваемых металлов, то здесь в первую очередь следует исходить из теории подобия [179], в соответствии с которой $t_{\text{св}} \equiv l^2$. Конечно, это является общей рекомендацией, так как в практике применения контактной сварки точное теоретическое подобие для $t_{\text{св}}$ обычно не соблюдается [179].

На основе многолетнего опыта широкого внедрения конденсаторных машин малой мощности установлено, что при точечной и рельефной сварке цветных и черных металлов толщиной до 0,5—0,7 мм для выбора ориентировочных значений t_a и $t_{\text{св}}$ также можно пользоваться данными рис. 58, а.

Значения $t_{\text{св}}$ и t_a при точечной и рельефной конденсаторной сварке металлов толщиной 0,8—2,5 мм, полученные на основе обобщения данных работ [78, 175, 228] и некоторых наших исследований, приведены на рис. 58, б.

На указанных выше графиках нижние их области соответствуют $t_{\text{св}}$ и t_a при сварке медных, алюминиевых и магниевых сплавов, а верхние — сварке коррозионностойких сталей, жаропрочных и титановых сплавов.

Указанные выше значения по выбору $t_{\text{св}}$ и t_a являются ориентировочными и должны корректироваться в каждом случае с учетом следующих рекомендаций: значения $t_{\text{св}}$ и t_a необходимо уменьшать с повышением теплопроводности $\lambda_{\text{с.м}}$ и температуропроводности $a_{\text{с.м}}$ свариваемого металла (что уменьшает размеры ЗТВ), а также коэффициента его линейного расширения (для уменьшения температурных деформаций в сварных соединениях); повышать значения $t_{\text{св}}$ и t_a следует с увеличением предела текучести $\sigma_{0,2}$ свариваемого металла, его твердости и склонности к образованию выплесков, а также в тех случаях, когда приходится применять довольно малые усилия сжатия.

Выбор усилия сжатия. При точечной и рельефной конденсаторной микросварке роль усилия сжатия F_a в первую очередь связана с величиной и влиянием в тепловом балансе контактных сопротивлений — деталь и электроды — детали. Поскольку зависимость между величиной этих сопротивлений и усилием F_a обратно пропорциональная, то одной из мер борьбы с выплесками при образовании

микросварных соединений может быть использование повышенных значений усилия сжатия $F_{\text{с}}$. При этом все контактные сопротивления уменьшаются и при данной величине тока $I_{\text{св}}$ в контактах деталь — деталь и электроды — детали выделяется меньше тепла.

Однако при конденсаторной микросварке часто приходится применять усилия $F_{\text{с}}$ меньше оптимальных. В таких случаях для предотвращения выплесков наиболее рационально не только уменьшать, но и стабилизировать величину сопротивлений $R_{\text{плх}}$ и $R_{\text{элх}}$, что на серийных машинах ТКМ-15, ТКМ-17 и ССП-3 обеспечивается благодаря подогреву свариваемых деталей.

Что касается применения повышенных усилий сжатия как средства уменьшения контактных сопротивлений (с целью снижения и даже предотвращения начальных выплесков) при точечной и рельефной конденсаторной сварке на машинах, не имеющих узлов подогрева деталей, то такой технологический прием следует считать полезным.

Ориентировочные значения усилия сжатия $F_{\text{с}}$ при точечной конденсаторной сварке металлов толщиной до 2,5—3,0 мм можно определять по формуле [165]

$$F_{\text{с}} \approx 0,785 d_{\text{с}}^2 \sigma_{\text{к}}, \quad (\text{V.3})$$

где $\sigma_{\text{к}}$ — давление в контакте свариваемых деталей, равное при точечной микросварке 50—100 Н/мм² (для пластичных металлов) и 100—300 Н/мм² (для жаропрочных и упрочненных металлов); при сварке металлов толщиной 0,8 мм и более [228] — 150—400 Н/мм² (для сталей, титановых и упрочненных алюминиевых сплавов) и 600—900 Н/мм² (для жаропрочных сплавов).

Кроме того, на основе значений $F_{\text{с}}$ для других толщин металла [137, 142, 175, 228] требуемое усилие сжатия можно выбрать исходя из критерия подобия ($F_{\text{с}} \propto \delta^2$) или приближенного подобия [179]. Необходимо также отметить, что при точечной конденсаторной сварке металлов толщиной до 0,5—0,7 мм обычным является неизменное значение $F_{\text{с}}$ как перед включением тока $I_{\text{св}}$, так и в процессе нагрева и кристаллизации металла в зоне сварки (см. рис. 50, б). Объясняется это тем, что при точечной конденсаторной микросварке усилия $F_{\text{с}}$ практически всегда оказываются вполне достаточными как для обжатия холодных деталей перед пропуском через них тока $I_{\text{св}}$, так и для уплотнения зоны сварки на конечной стадии образования сварного соединения.

Наконец, при точечной и рельефной конденсаторной сварке для подбора конкретных значений усилия сжатия $F_{\text{с}}$, а также ковочного $F_{\text{с.к}}$ (которое обычно [175, 228] применяют при точечной сварке металлов толщиной 1 мм и более) следует руководствоваться такими рекомендациями: в большинстве случаев микросварки значения $F_{\text{с}}$ могут быть по сравнению с оптимальными (или рекомендуемыми по литературным источникам) несколько уменьшены в случае применения предварительного подогрева свариваемых деталей; усилие $F_{\text{с}}$ при точечной и рельефной сварке металлов одинаковой толщины должно быть практически идентичным (при одновременной сварке двух

и более рельефов усилие F_a , выбранное для одного рельефа, следует увеличивать пропорционально их числу); выбранное для рельефной сварки усилие F_a должно быть таким, чтобы при сжатии холодных деталей не происходило деформирование (смятие) рельефов, но вместе с тем оно должно быть и достаточным для требуемого по условиям технологии уплотнения нагретого в зоне сварки металла; при необходимости применения ковочного усилия $F_{a,к}$ цикл сварки должен быть подобран так, чтобы приложенное усилие сжатия F_a повышалось до значения $F_{a,к}$ не раньше, чем через 2—5 мс после завершения нагрева зоны сварки током $I_{св}$.

По данным экспериментальных исследований [34, 88, 89, 91, 135, 142, 165, 175, 228] и широкого опыта внедрения, на рис. 58 приведены рекомендуемые F_a для точечной и рельефной конденсаторной сварки металлов толщиной до 0,7 мм на маломощных машинах и 0,8—2,5 мм на машинах средней и большой мощности.

Выбор формы и размеров контактной поверхности рабочих частей электродов и материалов для их изготовления. Поскольку этот вопрос подробно рассматривался в главе VI, ниже даются только наиболее важные конкретные рекомендации.

Из формулы $d_я = k_3 d_э$ видно, что при данном значении коэффициента k_3 диаметр $d_э$ контактной поверхности электрода (с цилиндрической или конической рабочей частью) должен выбираться в соответствии с диаметром ядра сварной точки $d_я$. Однако при точечной конденсаторной микросварке размер диаметра $d_э$ регламентируется механической прочностью рабочей части электродов. В связи с этим, чем меньше толщина свариваемого металла, тем больше несоответствие между $d_э$ и δ , хотя теоретически $d_э = \delta$. Например, если при точечной сварке металла толщиной 0,5 + 0,5 мм оптимальным является $d_э = 2$ мм, то при толщине 0,05 + 0,05 мм надо было бы применять $d_э = 0,2$ мм, что совершенно неприемлемо из-за практической невозможности работать электродами с таким малым размером их цилиндрической рабочей части (так как очень мала их устойчивость на изгиб при сжатии усилием F_a , весьма трудно устанавливать два таких электрода соосно и др.). Поэтому при точечной конденсаторной микросварке диаметр $d_э$ должен выбираться, во-первых, из условий прочности рабочей части цилиндрического электрода, во-вторых, с учетом того, что с уменьшением толщины свариваемых соединений значение коэффициента k_3 также снижается, поскольку при очень малых δ (менее 0,1—0,2 мм) наблюдается довольно значительная концентрация сварочного тока по центральной части $d_э$. Ниже приведена зависимость коэффициента k_3 от толщины металла δ :

δ , мм	k_3	δ , мм	k_3
0,05 + 0,05	0,3—0,35	0,4 + 0,4	0,65—0,70
0,1 + 0,1	0,35—0,40	0,5 + 0,5	0,75—0,80
0,2 + 0,2	0,45—0,50	0,6 + 0,6	0,85—0,90
0,3 + 0,3	0,55—0,60	0,7 + 0,7	0,95—1,0

Данные по выбору $d_э$, полученные на основе многолетнего опыта широкого внедрения серийных машин разных типов, приведены на

Таблица 15. Рекомендации по выбору материала рабочей части электрода

Параметр	Свариваемый металл	Материал электрода
Теплопроводность	Высокая	Низкая
Температура *	Низкая	Высокая
	Высокая	Высокая
Твердость	Низкая	Средняя (высокая)
	Высокая	Высокая
	Низкая	Средняя (высокая)

* Для свариваемого металла рассматривается температура плавления, а для материала электрода — температура рекристаллизации.

рис. 58, а и вполне могут служить для большинства случаев точечной микросварки.

При точечной конденсаторной микросварке иногда рационально применять электроды со сферической контактной поверхностью рабочей части, но в первую очередь это относится к случаям сварки металлов неравных толщин, причем такие электроды должны устанавливаться со стороны более тонкой детали. При этом имеет место увеличение плотности сварочного тока (поскольку диаметр d_k меньше, чем при электродах с плоской контактной поверхностью) и, следовательно, создается требуемое температурное поле.

Точечная конденсаторная сварка металлов толщиной 0,8—2,5 мм на отечественных машинах средней и большой мощности чаще всего выполняется электродами с конической и сферической формами рабочих частей, причем вторая наиболее предпочтительна [175, 228] для сварки адюминиевых сплавов. В зависимости от толщины свариваемых металлов ориентировочные размеры d_0 и R_0 следует выбирать по данным рис. 58, б, корректируя их в каждом конкретном случае, исходя в основном из конструкции сварного узла и требований к прочности сварных соединений.

Выбор формы и размеров контактной поверхности электродов для рельефной конденсаторной сварки не представляет особых затруднений. Со стороны детали с точечным рельефом (или несколькими такими рельефами, а также контурным рельефом) необходимо устанавливать электрод с конической рабочей частью, плоская контактная поверхность которой должна быть несколько больше площади, занимаемой рельефами на свариваемых деталях. К наружной поверхности детали без рельефов должен примыкать конический электрод с плоской контактной поверхностью возможно большего размера (для уменьшения ненужного выделения тепла в контакте его с деталью без рельефов).

Материал рабочей части электродов для точечной конденсаторной сварки металлов самых различных толщин следует выбирать в зависимости от марки и теплофизических свойств свариваемого металла. Некоторые рекомендации по этому важному вопросу приведены в табл. 15. При затруднениях с приобретением требуемой марки электродного материала весьма значительная его экономия может

быть получена благодаря изготовлению из него только рабочих частей электродов (основной его корпус может изготавливаться из твердотянутой и даже мягкой меди).

6. Схемы сварки и основные типы сварных соединений

Наиболее проста схема точечной конденсаторной сварки с двусторонним токоподводом двух металлических листов 2 равных и неравных толщин (рис. 59, а, б). По этим схемам широко внедрена точечная сварка различных металлов и сплавов толщиной до $0,5 + 0,7$ мм, а также до $3 + 3$ мм [135]. На рис. 59, в приведена схема точечной конденсаторной сварки пакета 4 из трех и более деталей. При необходимости получения на одной из лицевых сторон такого сварного соединения очень чистой поверхности без видимых следов от прохождения тока следует устанавливать с этой стороны электрод 1 или 3 с большой контактной поверхностью рабочей части. Конденсаторная сварка пакетов из нескольких деталей малых толщин с деталью большой толщины выполняется аналогично, но при этом электрод с большой контактной поверхностью устанавливается со стороны толстой детали.

Типы точечных соединений, выполняемых на конденсаторных машинах, весьма разнообразны (рис. 60). На рис. 60, а показаны точечные сварные узлы открытого, полукрытого и закрытого типов. В ряде сварных узлов из металлических листов разных толщин наиболее распространенной является односрезная нахлестка, значительно реже применяются двухсрезная нахлестка и стыковое соединение с накладкой (рис. 60, б). Широко распространенными являются типы микросварных соединений, показанные на рис. 60, в.

На точечных конденсаторных машинах наиболее распространенным является получение при каждой сварочной операции единичной сварной точки. Однако в процессе такой операции можно получить и две одновременно образующиеся сварные точки. Это может выполняться на машинах с односторонним токоподводом к электродам 1 (рис. 61, а); с двусторонним независимым токоподводом к каждой па-

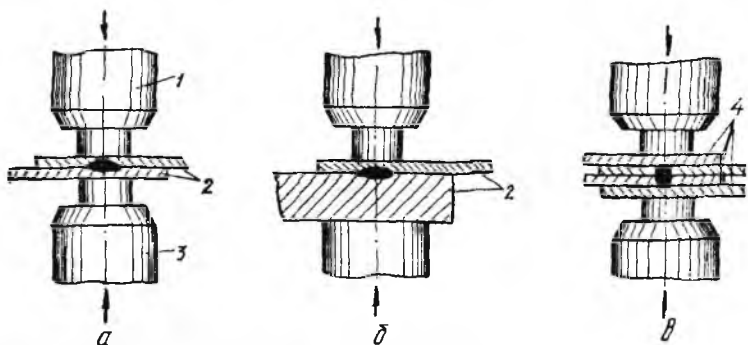


Рис. 59. Схемы двусторонней точечной конденсаторной сварки.

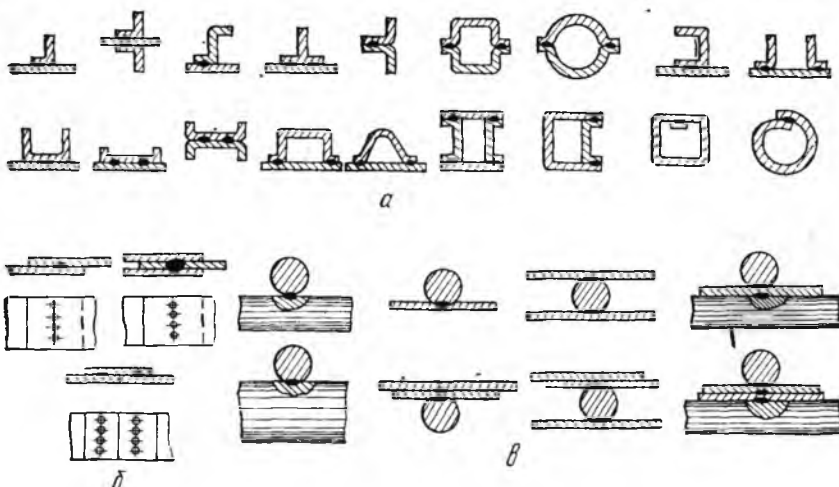


Рис. 60. Типы соединений и сварные узлы, выполняемые точечной конденсаторной сваркой:

а — узлы открытого, полуоткрытого и закрытого типов; б — односрезная и двухсрезная нахлестка и стыковое соединение с накладкой; в — разные типы соединений и узлов.

ре электродов или с обычным двусторонним токоподводом, но с использованием одного 3 (рис. 61, б) или двух специальных электродов со сдвоенными рабочими частями-вставками. Контактные поверхности этих вставок должны находиться в одной плоскости. При соблюдении этих условий сжатые между электродами свариваемые детали 2 плотно прилегают одна к другой и к контактным поверхностям обоих концов электродов, что обеспечивает примерно одинаковые площадки контактирования свариваемых деталей под левым и правым рабочими концами электродов.

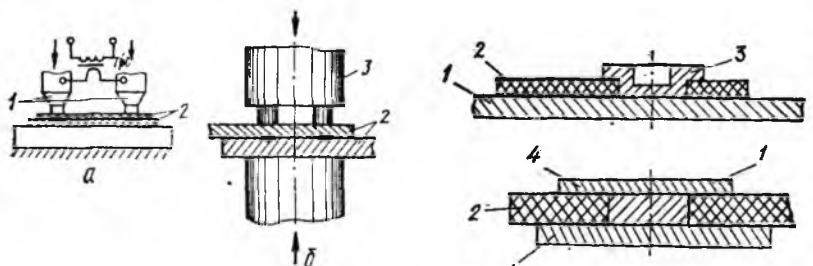
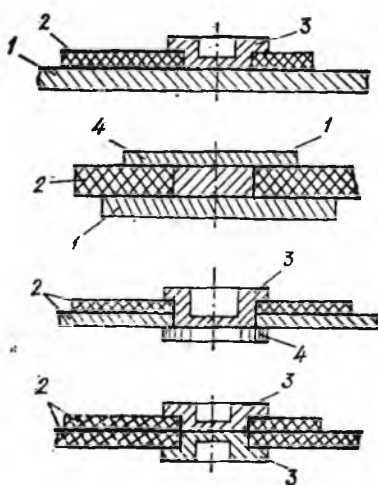


Рис. 61. Схемы одновременной сварки двух точек одним импульсом разрядного тока конденсаторов.

Рис. 62. Точечная конденсаторная сварка разнородных материалов с помощью вспомогательных деталей:

1 — деталь из легкосвариваемого металла; 2 — то же из трудносвариваемого металла или из неметаллического материала; 3 — вогнутый диск; 4 — плоский диск.



Способом точечной конденсаторной сварки могут быть соединены между собой не только детали из трудносвариваемых металлов, но также из металлов и неметаллов, что достигается применением вспомогательных металлических деталей (штампованных, в виде вогнутых и плоских дисков), которые изготавливаются из легкосвариваемых металлов. Эти детали служат как соединительные элементы. Некоторые типы таких соединений показаны на рис. 62.

При точечной конденсаторной сварке металлов неравных толщин ядро точки может смещаться в деталь большей толщины. Для предотвращения этого явления применяют следующие технологические приемы: между электродами и деталью малой толщины устанавливают дополнительную тонкую не сваривающуюся с ней прокладку из металла со значительно отличными от нее теплофизическими свойствами; со стороны листа малой толщины помещают электрод с незначительной теплопроводностью.

На точечных конденсаторных машинах по схеме с двусторонним токоподводом успешно производится приварка к листовым деталям различных штифтов.

Схема конденсаторной сварки листовой детали с короткими штифтами (длиной до 3—4 мм) аналогична схеме, показанной на рис. 59, б. Верхний электрод имеет плоскую поверхность рабочей части и прижимает штифт к детали, которая уложена на нижнем электроде.

Схема конденсаторной сварки тонких листовых деталей 3 с длинными штифтами показана на рис. 63, а. Штифт 2 зажимается в верхний электрод-цангу 1, причем вылет штифта не должен превышать 2—3 мм.

Схема конденсаторной сварки детали, имеющей выточку, со штифтом приведена на рис. 63, б. Конфигурация выточки в детали 3 должна строго соответствовать форме конца штифта 2. При этом необходимо, чтобы при вставленном в деталь штифте оставался небольшой зазор между концом последнего и дном выточки.

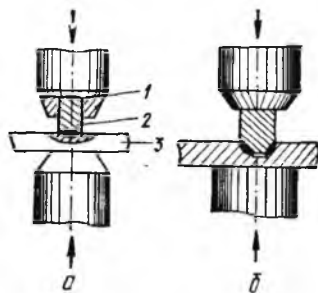


Рис. 63. Схемы сварки длинных штифтов с листами на точечных конденсаторных машинах.

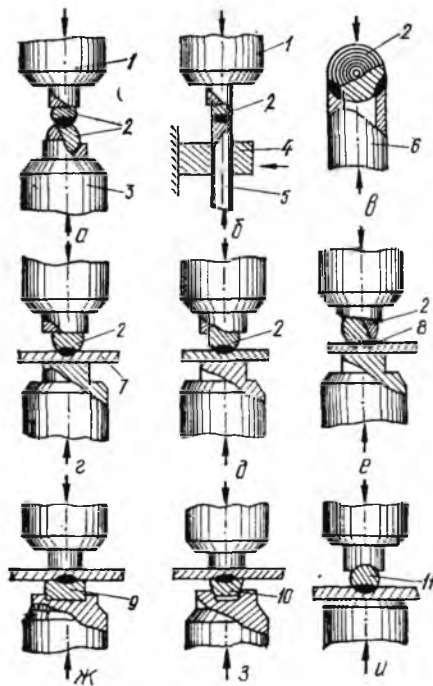


Рис. 64. Схемы конденсаторной сварки шариков и контактов.

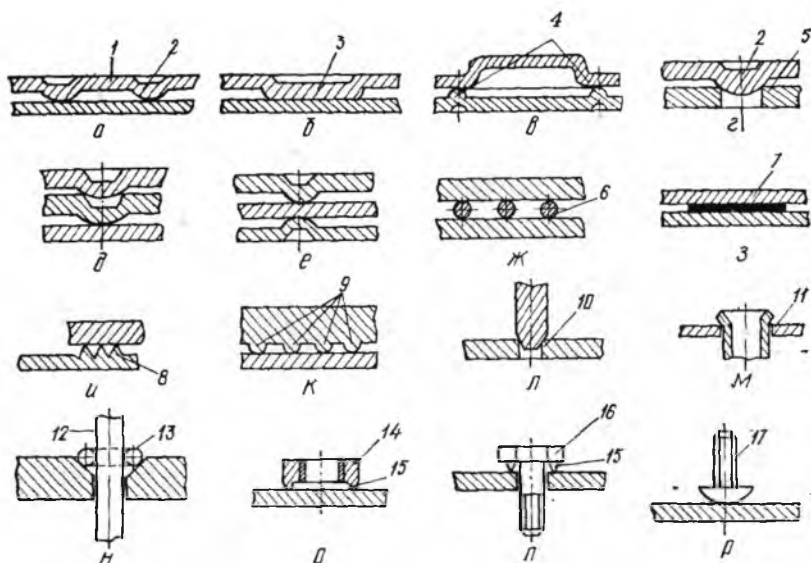


Рис. 65. Типы рельефо-точечных и рельефо-контурных соединений, выполняемых на конденсаторных машинах.

Конденсаторная сварка шариков 2 небольших размеров между собой показана на рис. 64, а (1, 3 — электроды). Сварка шариков 2 с деталями различных конфигураций выполняется по схемам, приведенным на рис. 64, б—е.

При сварке по схеме (рис. 64, б) вылет стержня 5 из зажимного устройства 4 делается минимальным, чтобы в нем выделялось возможно меньше тепла. Сварка по этой схеме возможна не только при плоском торце стержня, но и в случае, когда на его конце делается сферическая выемка, соответствующая размеру шарика.

При конденсаторной сварке шарика с трубкой 6 (рис. 64, в) сплавление этих деталей получается по кольцевой площадке их контактирования. При этом на конце трубки предварительно подготавливается кромка (фаска), обеспечивающая плотное прилегание к ней привариваемого шарика.

Сварка по схеме, приведенной на рис. 64, г, требует установки шарика в нужном месте плоской детали 7 по разметке, а сварка по схемам, приведенным на рис. 64, д, е, позволяет строго фиксировать положение шариков за счет сферической выемки (не показана на рис. 64, д) или отверстия 8 в плоских деталях 7. Две последние схемы обеспечивают более высокую прочность сварных соединений.

Схема конденсаторной сварки контакта цилиндрической формы 9 из благородных металлов и их сплавов с тонкими плоскими деталями показана на рис. 64, ж. В нижнем электроде делается выточка, в которую укладывается контакт. При сварке последнего с тонкой деталью образуется точка несколько меньшего диаметра, чем диаметр контакта, однако прочность сварного соединения и его электропроводность получаются достаточно высокими.

Схема (рис 64, а) соответствует случаю, когда на боковой поверхности контакта допустимы следы от прохождения сварочного тока. При сварке по этой схеме может быть получена очень чистая нижняя поверхность на коническом контакте 10, что достигается благодаря зазору между этим контактом и дном конической выточки в нижнем электроде.

Наконец, если проволоочный контакт 11 (небольшой отрезок проволоки) приваривают к плоской детали по схеме (рис. 64, и), то в верхнем электроде должна быть продольная выемка, соответствующая профилю проволоочного контакта.

Типы рельефных сварных соединений, выполняемых на конденсаторных машинах, весьма многочисленны (рис. 65).

Широко применяется сварка деталей (рис. 65, а) с одним, двумя и несколькими сферическими точечными рельефами 1, 2 на одной из деталей. Аналогичен и тип соединения с удлиненным овальным рельефом 3 (рис. 65, б). При необходимости получения герметичного сварного соединения из двух листовых деталей в одной из них (рис. 65, в) выдавливается контурный рельеф 4. Точное взаимное положение двух свариваемых деталей легко обеспечивается в соединении, показанном на рис. 65, г, когда они благодаря отверстию 5 в нижней детали устанавливаются по отношению друг к другу.

Легко свариваются между собой три тонких детали (рис. 65, д, е), в двух из которых делаются рельефы. Если по каким-либо причинам ни в одной из листовых деталей выдавливать рельефы нельзя, то между свариваемыми деталями помещают деталь (детали) с рельефами 6 или 7 (рис. 65, ж, з). Такой тип рельефного соединения применяют и в тех случаях, когда листовые металлы или сплавы, из которых изготовлены детали, плохо или не вполне удовлетворительно свариваются между собой. В этом случае деталь с рельефами изготавливают из металла, который хорошо сваривается с материалами этих деталей.

Типы рельефных соединений, показанные на рис. 65, и, к, характерны тем, что на одной из свариваемых деталей имеется по несколько рельефов 8, 9 различного профиля, причем они изготавливаются (штампуются) так, что на противоположной стороне никаких вмятин (как, например, в соединении по рис. 65, а) не получается. Это часто необходимо для обеспечения эстетических требований к сварному соединению.

К рельефным следует отнести и типы соединений, приведенные на рис. 65, л, м. Рельефами служат конический конец штифта (стержня) 10 и развальцованный на конус конец трубки 11.

Оригинален тип рельефного сварного соединения, показанный на рис. 65, н. Сварка стержня 12 с листовой деталью осуществляется с применением вводимого кольцевого рельефа 13, который в процессе нагрева зоны сварочным током прижимается благодаря фасонному верхнему электроду (на рисунке не показан) к кромкам конусной части отверстия в верхней части листовой детали. При этом такой рельеф плавится и соединяет между собой обе свариваемые детали.

Наконец, благодаря рельефной конденсаторной сварке могут соединяться с листами такие детали, как гайки 14 и болты 16 с кон-

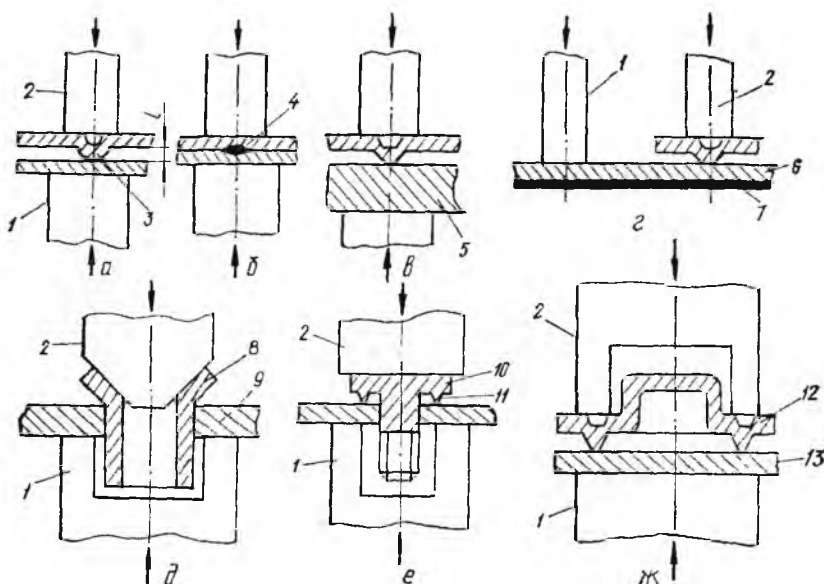


Рис. 66. Схемы рельефно-точечной и рельефно-контурной конденсаторной сварки.

турными рельефами 15 на них (рис. 65, о, п), а также болты 17, имеющие рельеф в виде сферической головки (рис. 65, р).

Некоторые схемы выполнения рельефных соединений показаны на рис. 66. Здесь простейшей является схема сварки (рис. 66, а) с двусторонним токоподводом к деталям, расположенным между электродами 1, 2, на одной из которых имеется один рельеф 3. Основным требованием является то, что зазор 1 (или высота рельефа) должен быть таким, чтобы после образования сварной точки 4 (рис. 66, б) обе детали оказались плотно прижатыми друг к другу.

Рельефная конденсаторная сварка деталей 5 неравных толщин выполняется по схеме рис. 66, в.

Практически совершенно не нарушается защитное декоративное покрытие 7 (металлическое и органическое), нанесенное на одну из сторон детали 6, при сварке с другой деталью, имеющей рельеф, при одностороннем токоподводе (рис. 66, г). По этой схеме можно выполнять сварку крупногабаритных деталей сложного профиля с большим соотношением толщин. Сварка втулки 8 с листовой деталью 9 осуществляется по схеме, приведенной на рис. 66, д. Здесь нижний электрод имеет выемку, высота и диаметр которой превышают аналогичные размеры втулки.

Сварка болта 10, на котором делается кольцевой рельеф 11, с листовой деталью, имеющей выемку под этот болт, производится по схеме, приведенной на рис. 66, е. Здесь конструкция нижнего специального электрода аналогична конструкции такого же электрода в предыдущей схеме. Верхний электрод 2 должен иметь плоскую глад-

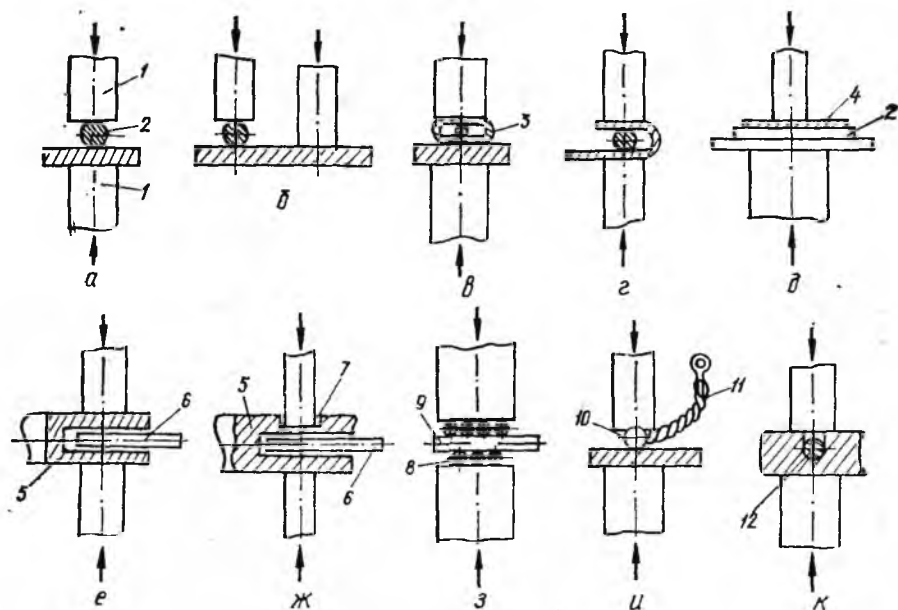


Рис. 67. Схемы точечной конденсаторной сварки тонких проводов.

кую поверхность с площадью, большей площади головки болта (при сферической головке болта в верхнем электроде делается выемка соответствующей формы).

На схеме (рис. 66, ж) показано, как свариваются детали типа крышка 12 — корпус (дно) 13. В таком соединении сварка обеих деталей выполняется электродами 1 и 2, конструкция которых ясна из описания предыдущих схем.

Многообразные схемы, по которым производится точечная конденсаторная микросварка очень тонких (диаметр менее 0,1 мм) проводов с различными листовыми и проволочными деталями, представлены на рис. 67.

Схема сварки (двусторонней) микропровода 2 с тонкой листовой деталью, расположенной между электродами 1, показана на рис. 67, а. Поскольку из-за малого диаметра такого провода здесь практически невозможно использовать электроды с выемкой по радиусу привариваемого провода в их рабочей части, приходится обходиться без нее и выполнять сварку электродами с плоской гладкой поверхностью, что, однако, довольно часто приводит к сплющиванию проводов в зоне сварки и обуславливает преждевременный износ электродов. Односторонняя сварка таких же деталей осуществляется по схеме, показанной на рис. 67, б. Увеличить срок службы рабочих частей электродов можно по схемам, приведенным на рис. 67, в, г. В первой требуется применять вводимую деталь — втулку 3, а во второй — небольшой отрезок тонкой металлической скобки. Последняя надевается на конец привариваемого к тонкой листовой детали провода и

вводится в зазор между электродами. После сжатия последних эта скобочка сплющивается, и при сварке соединяются между собой все три детали (скобочка, провод и тонкий лист). Сварка тонких проводов с тонкой листовой деталью может выполняться по схеме рис. 67, д. Между электродом и проводом 2 помещается дополнительная листовая деталь 4 — сваривающаяся с проводом.

Схемы сварки тонкого провода с проводами больших диаметров показаны на рис. 67, е, ж. В обоих случаях в толстых проводах 5 делаются выемки, в которые заводятся концы очень тонкого провода 6, затем оба эти провода сжимаются между электродами и свариваются между собой. Если диаметр провода 5 настолько значителен, что на данной конденсаторной машине невозможно обеспечить его расплавление в зоне сварки, то это может быть устранено за счет выемки 7 (см. рис. 67, ж), благодаря которой верхняя часть (по разрезу) провода 5 получается значительно тоньше и для сварки требуется меньшая энергия W_n .

Очень тонкий провод 8 может быть сварен с толстым проводом 9 и по схеме, приведенной на рис. 67, з. Вокруг толстого провода плотно навивается несколько витков тонкого провода и в таком состоянии они сжимаются между электродами точечной конденсаторной машины и свариваются.

Может быть успешно применена точечная сварка многожильного провода с тонкой листовой деталью, хотя известно, что при сжатии между электродами конец такого провода, состоящего обычно из большого числа очень тоненьких проволочек, легко сплющивается и принимает форму пластинки, размеры и толщина которой непостоянны, что во многом затрудняет процесс конденсаторной сварки и дестабилизирует его. Однако этот недостаток полностью устраняется при сварке по схеме, показанной на рис. 67, и, в соответствии с которой конец 10 многожильного провода 11 заранее (это является дополнительной технологической операцией) оплавляется в шарик, а затем приваривается к листовой детали (причем в верхнем электроде делается сферическая выемка, соответствующая радиусу такого шарика).

Соединение тонкого провода (в том числе в изоляции) с другой деталью различной конфигурации может выполняться и по схеме 67, к. Здесь провод размещают в открытом пазу 12 этой детали, причем глубина паза несколько превышает диаметр провода. В начале прохождения сварочного тока нагретый металл края паза под действием усилия сжатия F_s выдавливается в свободный объем между верхним электродом и проводом. В результате контактирования нагретого металла с проводом изоляция на его поверхности выгорает, а дальнейший нагрев и сжатие обеих деталей обеспечивают получение их неразъемного соединения.

В заключение следует отметить, что рассмотренные типы соединений и схемы сварки далеко не исчерпывают возможные варианты выполнения точечных и рельефных сварных соединений.

7. Подготовка поверхности свариваемых деталей

Состояние поверхности деталей перед сваркой во многом определяет такие показатели качества сварных соединений, как прочность, внешний вид, начальные выплески и следы на деталях от материала электродов. Кроме того, от состояния поверхности деталей зависят стойкость рабочих частей электродов и требуемая периодичность их зачистки. Это вызвано тем, что при сварке в результате взаимодействия материала рабочей части электрода с поверхностью свариваемого металла электрод загрязняется. Достаточно объективным параметром качества поверхности свариваемых деталей следует считать не начальное общее сопротивление зоны сварки $R_{з.с.х}$ [228], а сумму трех ее контактных сопротивлений в холодном состоянии

$$\Sigma R_{кх} = R_{длх} + R_{с1д1х} + R_{с2д2х}. \quad (V.4)$$

Тем не менее в практических условиях проще измерять не суммарное контактное сопротивление $\Sigma R_{кх}$, а общее начальное сопротивление $R_{з.с.х}$. Однако делать это необходимо при возможно более строгом постоянстве значений $F_з$ и $d_з$. Повышению точности указанных опытов также будет способствовать хорошее состояние контактных поверхностей рабочих частей электродов.

Сопротивление $R_{з.с.х}$ двух металлических деталей следует измерять, сжав их между электродами контактной конденсаторной машины для точечной сварки (при разомкнутом ее вторичном контуре, для чего один из электродов электрически изолируют от электрододержателя, например, с помощью пластмассовой конусной втулки) или с помощью пресса, позволяющего создавать требуемые по величине стабильные усилия $F_з$ сжатия. Усилие $F_з$ и диаметр $d_з$ (или радиус сферы $R_{сф}$ рабочей части электродов) должны соответствовать значениям, заданным в технологической карте на конкретную сварочную операцию.

Измерения $R_{з.с.х}$ выполняют с помощью микрометра (типа М-246, Ф-415 и др.) выборочно на разных деталях данной партии. При данных конкретных условиях число измерений должно быть не менее 20—30. Измеренные значения $R_{з.с.х}$ не должны превышать допустимый диапазон разброса $\pm \Delta R_{з.с.х}$, устанавливаемый для свариваемых материалов с учетом влияния этих отклонений на качество сварного соединения.

Известно, что абсолютное значение $R_{з.с.х}$ с течением времени увеличивается, причем диапазон разброса ($\pm \Delta R_{з.с.х}$) зависит от условий хранения деталей, а также от качества и способа обработки их поверхностей. В частности, наблюдается более значительный рост $R_{з.с.х}$ при попадании на детали пыли, масла, плохой обработке (нейтрализации) деталей после травления, некачественной пассивировке и др. Поэтому, когда сварка деталей, прошедших подготовку поверхности,

Таблица 16. Реактивы и режим химического травления металлов малых толщин в сечений

Металл	Состав электролита, мл	Продолжительность обработки	Температура, °С	Средняя толщина удаляемого слоя, мкм
Медь	H ₂ SO ₄ 500, HNO ₃ 500, NaCl 2—5 г/л	20 с	20	2,5—3,0
Молибден	HNO ₃ 500, H ₂ SO ₄ 250, H ₂ O 250 мл	1—10 с	50—60	1—3
Тантал, ниобий	H ₂ SO ₄ 500—600 HNO ₃ 200, HF 200	10—15 с	30—40	До 3
Титан	HNO ₃ 500, H ₂ O 500, KF 50 г/л	2—10 мин	18—25	2—5
Никель, ковар	а) HNO ₃ 330, HCl 330, H ₂ O 340	10—30 с	70—80	5—15
Константан	б) HCl 1000 HNO ₃ 500, H ₂ SO ₄ 500, NaCl 5—10 г/л	1—5 мин 10—20 с	70—80 20	2—5 До 3,0
Нихром	HCl 400, H ₂ O 600, K ₂ Cr ₂ O ₇ 25 г/л	До снятия оксидной пленки	60—70	—

Примечание. Плотность H₂SO₄ — 1,84; HNO₃ — 1,42; HCl — 1,19 г/см³; HF — концентрированная.

выполняется не сразу после нее, а через какое-то время, необходимо определить указанный выше диапазон $\pm \Delta R_{з.с.х}$ и степень его влияния на качество соединения с учетом конкретного времени хранения деталей и исходя из этого окончательно установить допустимый диапазон разброса $\Delta R_{з.с.х}$. Время окончания подготовки поверхности детали и диапазон разброса $\Delta R_{з.с.х}$ после подготовки и перед сваркой необходимо фиксировать в технической документации. Не следует производить сварку деталей, если диапазон разброса $\pm \Delta R_{з.с.х}$ превышает допустимый.

При точечной и рельефной конденсаторной сварке цветных и черных металлов различных толщин и сечений применяются следующие способы подготовки (очистки) поверхности свариваемых деталей: обезжиривание, химическое и электролитическое травление и полирование; отжиг деталей в очищенном и увлажненном водороде, окислительно-восстановительный отжиг и, наконец, отжиг в вакууме, комбинированные отжики в различных атмосферах.

Применяемые в промышленности методы химической и термической очистки деталей обеспечивают стабильное удаление поверхностных загрязнений только при соблюдении режимов и условий обработки. Однако ряд методов контроля таких загрязнений (масс-спект-

Таблица 17. Режимы отжига металлов малых толщин и сечений

Металл	Толщина, мм	В водороде *			В вакууме **		
		Температура, °С	Время выдержки, мин		Температура, °С	Время выдержки, мин	
			Нагрев	Охлаждение		Нагрев	Охлаждение
Никель	0,1—0,2	750±25	5—10	20—30	—	—	—
	0,2—0,3	850±25	10—15	30—45	850—900	10—15	30—40
	0,3—0,8	950±25	15—20	30—45	900—950	10—30	40—60
Медь	0,1—0,5	650±25	10—15	20—30	650—750	20—30	30—40
Ковар	0,1—1,0	1110±25	20—40	40—60	1000—1100	20—30	40—60
Сталь 20	0,1—0,3	950—1100	10—30	20—60	1000—1100	20—30	40—60
Нержавеющая сталь	0,1—0,5	—	—	—	1000—1100	40—60	40—60
Константан	0,1—0,5	800±25	10—15	до 45	900±25	20—30	40—60
Титан	0,1—0,3	—	—	—	900—1100	15—20	60—80
Тантал	0,1—0,3	—	—	—	1800—2000	20—30	60—80
Молибден	0,1—0,5	1000—1100	10—15	20—30	—	—	—
Вольфрам	0,1—0,6	1200—1500	20—30	до 30	1700±50	20—30	40—60

* Точка росы от -50 до -60 °С, содержание O₂ не выше 0,0005 %;** Давление не выше 6,65·10⁻⁴ Па.

рометрические, спектральные, радиохимические, спектрофотометрические, люминесцентные и др.) не везде в должной мере внедрены.

В табл. 16, 17 приведены некоторые реактивы и режимы подготовки поверхности свариваемых деталей из металлов малых толщин и сечений [123, 176], а в работах [78, 175, 228] даны реактивы и режимы такой подготовки деталей из металлов толщиной 0,8—3,0 мм.

8. Микросварка однородных металлов

Для получения качественных точечных микросварных соединений из металлов малых толщин и сечений необходимо не только правильно выбрать оптимальные значения основных параметров режима конденсаторной микросварки, но и обеспечить стабильность ряда других параметров этого процесса и условий его выполнения.

Необходимо еще раз подчеркнуть, что стабильность параметров режима рационально разработанной технологии точечной и рельефной конденсаторной микросварки должна обеспечиваться высоким техническим уровнем применяемого микросварного оборудования [41]. Кроме того, рекомендуемую базовую технологию этих способов конденсаторной микросварки при использовании в промышленности необходимо корректировать в соответствии с конкретными условиями.

В связи с изложенными выше соображениями при выборе и корректировке основных параметров режимов сварки следует также

Таблица 18. Размеры зоны термического влияния, мм

Металл	Толщина пакета, мм	Время $t_{\text{св}}$, мс	$x_{\text{зтв}p}$	$x_{\text{зтв}ф}$
Сталь 12Х18Н9Т	0,2+0,2	5	0,58	0,15
		10	0,81	0,21
Бронза БрБ2,5	0,15+0,15	3	1,08	0,12
		6	1,52	0,18

Примечание. Расчетные размеры ЗТВ определялись по формуле $x_{\text{зтв}} = 4 \sqrt{a_{\text{с.м}} t_{\text{св}}}$, а фактические — измерением на металлографических снимках исследованных микросварных соединений.

учитывать некоторые особенности процесса конденсаторной микросварки, которые рассмотрены ниже.

Известно, что режимы точечной и рельефной контактной сварки сопротивлением принято [175] называть мягкими, если время $t_{\text{св}} \geq 0,1$ с, и жесткими при $t_{\text{св}} < 0,1$ с. Однако при всех способах конденсаторной сварки, и в первую очередь в области микросварных соединений, время $t_{\text{св}}$ может составлять не только несколько миллисекунд, но даже десятки доли миллисекунды. В связи с этим следует ввести и понятие о «сверхжестких» режимах контактной сварки сопротивлением, когда $t_{\text{св}} \leq 0,01$ с, которые наиболее характерны для точечной и рельефной конденсаторной микросварки. Однако такие термины, как «мягкие», «жесткие» и «сверхжесткие» режимы контактной сварки сопротивлением, которые совершенно не связаны с конкретными металлами (а значит и их свойствами) и условиями этого процесса, дают только общее представление о количественных значениях времени $t_{\text{св}}$ и отвергаются теорией подобия [179], устанавливающей, что $t_{\text{св}} \equiv \delta^2$. Теоретически это означает, что при прочих равных условиях для каждой толщины конкретного металла δ есть соответствующее ей значение времени $t_{\text{св}}$, которое и является оптимальным временем сварки.

При точечной и рельефной конденсаторной микросварке с уменьшением фактически применяемого в каждом конкретном случае оптимального времени $t_{\text{св}}$ уменьшается глубина фронта распространения в зоне сварки высоких температур и повышается интенсивность тепловыделения за время t_a (см. рис. 51) в зонах электроды — детали и деталь — деталь. Поэтому если не использовать некоторые технологические приемы, то в процессе сварки могут наблюдаться такие дефекты, как вылески, подплавления, подгорания, прихватывание контактных поверхностей электродов к деталям, поры, раковины, трещины и др. Если время $t_{\text{св}}$ увеличивать, то расположение области максимальных температур, характер формирования соединения в большей степени определяются условиями теплоотвода, что может обусловить смещение ядра сварной точки в более толстую деталь (при микросварке неравных толщин) или в материал с меньшей теплопроводностью (при соединении разнородных металлов), появление непроваров, интенсификацию процессов рекристаллизации,

газопоглощения, снижение прочностных характеристик соединения, существенное изменение служебных свойств металла в ЗТВ и др.

Следует подчеркнуть, что при конденсаторной микросварке на оптимальных режимах фактическая ширина ЗТВ $x_{зтвф}$ получается весьма небольшой и значительно меньше расчетной [49, 52] $x_{зтвр}$ (табл. 18).

В связи с большими абсолютными значениями и значительным диапазоном разброса величин сопротивлений $R_{дд}$ и $2R_{эд}$, а также их существенной ролью в общем тепловом балансе при конденсаторной микросварке даже при оптимальных значениях основных параметров режима трудно получить микросварные соединения без выплесков жидкого металла, которые в большинстве случаев не видны невооруженным глазом. Для выполнения безвыплесковых микросварных соединений в последнее время широко используется подогрев зоны микросварки, который является важной составной частью технологического процесса конденсаторной микросварки.

Теоретический анализ и опыт показывает, что вопрос о физическом влиянии подогрева на образование выплесков довольно сложен. Он сводится не только к необходимости уменьшения в процессе подогрева контактных сопротивлений $R_{дд}$ и $2R_{эд}$, но и к неперменной стабилизации их значений и образованию практически равных по размеру площадок контактирования свариваемых деталей.

При этом наиболее целесообразно, чтобы, во-первых, стабильные и уменьшенные значения $R_{дд}$ и $2R_{эд}$ были одновременно и минимальными, а во-вторых, обеспечивалась технологически возможно большая величина фактической поверхности контактирования [70] свариваемых деталей. Тогда при стабильно малых $R_{дд}$ и $2R_{эд}$ можно легко обеспечить постоянство $Q_{дд}$ и $2Q_{эд}$, а увеличение поверхностей контактирования обусловит соответствующее уменьшение плотности сварочного тока, что облегчит получение стабильной безвыплесковой сварки.

При выборе электрических параметров режима подогрева следует учитывать, что с увеличением толщины (диаметра), твердости, предела текучести и с уменьшением коэффициента теплопроводности λ , номинальной площади контактирования [70] свариваемых деталей и усилия F_s растет время подогрева $t_{под}$. Предельное значение этого времени в большинстве случаев не превышает времени $t_{св}$, а значение тока $I_{под}$ в зависимости от конкретных технологических задач должно составлять (0,3—0,8) $I_{св}$.

Наши исследования [36, 37, 41—43, 83, 149, 150] и опыт внедрения конденсаторной микросварки показали, что уменьшение и стабилизация путем подогрева контактных сопротивлений $R_{дд}$ и $2R_{эд}$ является одним из важнейших условий не только предотвращения выплесков, но и стабилизации тепловыделения в зоне микросварки при прохождении импульса сварочного тока.

Ниже в ряде таблиц приведены режимы точечной и рельефной микросварки различных материалов как с подогревом зоны соединения, так и без него. В тех случаях, когда требуются высокая стабильность качества микросварного соединения и отсутствие выплес-

Таблица 19. Величина шага точек I_T для металлов толщиной $\delta \leq 0,8$ мм

Металл	Число деталей в пакете	Наименьший шаг точек, мм, при толщине каждой детали, мм							
		До 0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8
Нихром, фехраль, хромель	2	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5	4,0	—	—
	3	1,5	2,5	3,0	3,5	4,0	4,5	—	—
Коррозионно-стойкие, жаропрочные и малоуглеродистые стали, никель, пермаллой, титан	2	1,5	2,0	2,5	3,5	4,5	5,5	7,0	8,5
	3	2,0	2,5	3,0	4,0	5,0	6,5	8,0	11,0
Латунь, бронза, мельхиор, нейзильбер	2	1,5	2,0	3,0	4,0	5,0	6,5	—	—
	3	2,0	2,5	3,5	5,0	6,0	8,0	—	—
Алюминий и его сплавы	2	2,5	3,0	4,0	5,5	7,0	8,0	—	—
	3	3,0	4,0	5,5	7,5	10,5	12,0	—	—

ков, микросварку необходимо выполнять на циклах с подогревом деталей. В серийных конденсаторных машинах малой мощности этот подогрев осуществляется разрядным током рабочих конденсаторов (машины ТКМ-14, ССП-3, МТК-501, ССП-5) за счет регулирования переднего фронта $I_{св}$ (машины ТКМ-15, ТКМ-17, ССПИ-4) или прохождения через детали трансформированных импульсов переменного тока (машины СС-7, МТК-2001).

В реальных производственных условиях для уменьшения трудоемкости работ по корректировке электрических параметров режимов сварки и подогрева можно приближенно считать, что значения $I_{под}$, $I_{св}$ возрастают практически пропорционально увеличению U_c и $\sqrt{C_p}$ и уменьшению k_T , а значения $t_{под}$, $t_{св}$ — пропорционально увеличению $\sqrt{C_p}$ и k_T .

Для получения стабильных точечных и точечно-рельефных соединений необходимо учитывать и явление шунтирования тока $I_{св}$. Теория и опыт показывают, что при точечной конденсаторной микросварке шунтирование сварочного тока получается незначительным, что главным образом обусловлено малой толщиной свариваемого металла δ и небольшим диаметром контактной поверхности электродов. Влиянием шунтирования тока на прочность точек можно практически пренебречь, если проводить микросварку с шагом точек, равным или большим, чем указано в табл. 19.

Точечная микросварка меди, латуни и бронзы. Известно [52], что контактная сварка меди сопряжена с большими трудностями, которые обуславливаются ее высокой тепло- и электропроводностью, а также весьма узким диапазоном температур, в котором она может быть осуществлена. В связи с этим контактная сварка меди имеет весьма ограниченное применение.

Исследованиями установлено, что точечная конденсаторная микросварка меди малых толщин (до 0,5 мм) может быть удовлетворительной, если применять электроды с рабочими вставками диаметром до 2—3 мм из вольфрама, молибдена и их сплавов. Точечную конденсаторную микросварку меди можно производить, предварительно нанося на ее поверхность слой лужения вполне определенной и неизменной толщины (лучше всего это делать электролитическим способом), что обеспечивает несколько более высокую стабильность сварки. Исследования также показали, что этим же способом можно хорошо сваривать медные сплавы малых толщин (латуни Л63 и Л68, бронзы бериллиевые, оловянно-цинковые и оловянно-фосфористые, мельхиор, нейзильбер и др.).

Известно [52], что контактную сварку латуней необходимо производить на жестких режимах, что обусловлено наличием в этих сплавах большого количества цинка, имеющего низкую температуру кипения.

Точечная конденсаторная микросварка латуней Л63 и Л68 толщиной до 0,6 мм может хорошо выполняться (см. рис. 45, *б*) на мало-мощных конденсаторных машинах ТКМ-15, ТКМ-17 и др. [113, 135, 144, 145, 147, 150, 155, 157, 159—161]. Если необходимо сваривать латуни Л63 и Л68 толщиной свыше 0,6 мм, то в этих случаях следует применять более мощные машины — МТК-75, МТК-5001, МТК-8004 и др.

В процессе исследования конденсаторной микросварки латуни Л63 с двусторонним антикоррозионным покрытием (хромированием и лужением) установлено, что очень трудно получить прочные соединения без частичного или полного разрушения этих антикоррозионных покрытий и заметных следов на деталях от прилипания электродов, а при микросварке никелированной латуни Л63 на поверхности деталей образуются небольшие вмятины. Точечная конденсаторная сварка серебряной и золоченой латуни Л63 дает вполне удовлетворительные результаты.

Режимы точечной конденсаторной сварки различных металлов и сплавов приведены в табл. 20, где также показаны значения разрывных усилий F_p на сварную точку. При сварке латуни Л68 обеспечивается высокая и стабильная прочность точек, а сварка латуни Л80 менее стабильна и для нее требуется несколько большая энергия W_k . Еще хуже сваривается латунь Л90 (томпак) и совершенно неудовлетворительно — латуни, содержащие свинец (например, ЛС59).

При точечной конденсаторной микросварке бронзы БрОФ 6,5-0,4 раскисление рабочих поверхностей электродов мало, так как вследствие быстрого процесса сварки испарение фосфора незначительно. В целом при точечной сварке бронз этой и других марок получают соединения с литым ядром и удовлетворительным внешним видом.

Испытания на разрыв образцов бронз малых толщин, сваренных на режимах, приведенных в табл. 20, показывают высокую стабильность прочности точек.

Положительные результаты при исследовании точечной конденсаторной микросварки бронзы БрОФ 6,5-0,4 с разными антикоррози-

Таблица 20. Ориентировочные режимы точечной микросварки и значения

Толщина деталей мм	Параметры режима					
	установочные					
	C_p , мкФ	U_c , В	k_T	$w_{др}$	F_{∂} , Н	d_{∂} , мм
Латунь Л63 Машина						
0,05+0,05	70	600	100	—	40	1,0
0,1+0,1	110	600	100	—	50	1,0
0,2+0,2	180	600	100	—	80	1,5
0,3+0,3	250	600	100	—	100	1,5
0,4+0,4	550	600	100	—	150	2,0
0,5+0,5	660	600	125	—	200	2,5
0,6+0,6	800	600	125	—	230	2,5
Машина						
0,05+0,05	50	400	50	60	40	1,0
0,1+0,1	100	480	50	80	50	1,0
0,2+0,2	150	500	50	80	80	1,5
0,27+0,27	150	520	50	80	100	2,0
0,5+0,5	500	880	50	80	200	3,0
Бронза БрОФ 6,5-0,4 Машина						
0,05+0,05	60	600	100	—	40	1,0
0,1+0,1	80	600	100	—	50	1,0
0,2+0,2	200	600	100	—	80	1,5
0,3+0,3	320	600	100	—	100	1,5
0,4+0,4	480	600	100	—	150	2,0
0,5+0,5	600	600	100	—	200	2,5
Машина						
0,1+0,1	50	400	50	60	50	1,0
0,2+0,2	100	520	50	80	80	1,5
0,3+0,3	200	540	50	80	100	2,0
0,5+0,5	700	800	100	80	200	3,0
Латунь Л63 Машина						
0,1+10	150	600	100	—	50	1,0 *
0,2+10	270	600	100	—	80	1,0 *
0,3+10	400	600	100	—	100	1,5 *
Машина						
0,1+10	100	480	50	80	50	1,5 *
0,2+10	150	500	50	80	80	1,5 *
0,3+10	200	520	50	80	100	2,0 *
Алюминий А97 Машина						
0,1+0,1	100	600	75	—	100	1,5
0,2+0,2	180	600	75	—	150	1,5
0,3+0,3	250	600	75	—	210	2,0
0,4+0,4	360	600	75	—	250	2,5
0,5+0,5	460	600	75	—	300	3,0

разрывных усилий F_p на точку

сварки					F _{ср} , Н
технологические					
I _{под} , кА	I _{св.мах} , кА	t _{под} , мс	t _з , мс	t _{св} , мс	
(равные δ)					
ТКМ-7					
—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	110
—	—	—	—	—	301
—	—	—	—	—	428
—	—	—	—	—	515
—	—	—	—	—	551
—	—	—	—	—	—
ТКМ-15					
1,1	2,2	0,6	1,5	2,0	65
1,6	4,0	1,0	1,5	3,5	112
1,7	4,5	1,0	1,5	4,0	310
1,9	4,9	1,0	1,5	4,0	430
2,4	11,6	1,2	2,1	5,8	600
(равные δ)					
ТКМ-7					
—	—	—	—	—	85
—	—	—	—	—	160
—	—	—	—	—	325
—	—	—	—	—	470
—	—	—	—	—	565
—	—	—	—	—	620
ТКМ-15					
1,6	3,2	1,0	1,3	4,0	—
1,9	4,4	0,8	1,5	4,5	—
1,9	4,7	0,85	1,6	5,0	—
2,4	10,4	0,95	3,0	7,5	—
(неравные δ)					
ТКМ-7					
—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—
ТКМ-15					
1,6	4,0	1,0	1,4	3,5	—
1,7	4,5	1,0	1,5	4,0	—
1,9	4,9	1,2	1,7	4,5	—
(равные δ)					
ТКМ-7					
—	—	—	—	—	40
—	—	—	—	—	74
—	—	—	—	—	110
—	—	—	—	—	210
—	—	—	—	—	292

Толщина де- талей мм	Параметры режима					
	установочные					
	C_p , мкФ	U_c , В	k_T	$w_{др}$	F_a , Н	d_a , мм
						Машина
0,1+0,1	50	500	50	120	100	1,5
0,2+0,2	100	600	50	120	150	1,5
0,3+0,3	100	780	50	120	210	2,0
0,5+0,5	200	1000	50	120	300	3,0
						Никель Н1 Машина
0,1+0,1	100	600	75	—	40	1,0
0,15+0,15	140	600	75	—	50	1,0
0,25+0,25	240	600	75	—	80	1,5
						Машина
0,1+0,1	50	320	50	60	50	1,5
0,2+0,2	200	580	200	60	80	1,5
						Нейзильбер НМЦ 65-20 Машина
0,1+0,1	140	600	75	—	85	1,0
0,2+0,2	200	600	75	—	100	1,0
0,3+0,3	340	600	75	—	170	1,5
0,5+0,5	450	600	75	—	300	2,5
						Сталь 10 Машина
0,05+0,05	50	600	100	—	70	1,0
0,1+0,1	50	600	100	—	90	1,0
0,3+0,3	160	600	100	—	160	1,5
0,5+0,5	350	600	75	—	400	2,5
0,7+0,7	800	600	75	—	560	3,0
						Машина
0,05+0,05	100	300	50	60	80	1,0
0,25+0,25	200	450	100	80	150	2,0
0,5+0,5	1000	520	50	140	420	3,0
						Сталь 10 Машина
0,1+8,0	90	600	100	—	90	1,0 *
0,2+8,0	160	600	100	—	120	1,5 *
0,3+8,0	290	600	100	—	160	1,5 *
						Машина
0,05+8,0	100	300	50	60	80	1,0 *
0,25+8,0	200	450	100	80	150	2,0 *
0,5+8,0	1000	520	100	140	420	3,0 *

сварки					F _{рсп.} Н
технологические					
I _{под.} кА	I _{св.мах.} кА	t _{под.} мс	t _{в.} мс	t _{св.} мс	
ТКМ-15					
1,1	3,2	1,6	2,0	3,5	—
1,6	4,8	1,2	2,0	5,0	—
1,6	6,4	0,8	2,0	5,0	—
3,2	13,6	0,8	2,5	6,0	—
(равные δ)					
ТКМ-7					
—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—
ТКМ-15					
1,0	2,7	1,0	1,6	2,6	89
1,6	4,3	1,2	1,6	4,0	168
(равные δ)					
ТКМ-7					
—	—	—	—	—	127
—	—	—	—	—	248
—	—	—	—	—	520
—	—	—	—	—	685
(равные δ)					
ТКМ-7					
—	—	—	—	—	102
—	—	—	—	—	205
—	—	—	—	—	703
—	—	—	—	—	827
—	—	—	—	—	964
ТКМ-15					
0,5	2,1	0,8	1,6	2,5	—
0,8	2,6	1,1	2,5	6,0	—
0,6	3,2	1,8	6,0	12,0	—
(неравные δ)					
ТКМ-7					
—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—
ТКМ-15					
0,56	2,1	0,8	1,6	2,5	—
0,8	2,6	1,1	2,5	6,0	—
0,6	3,2	1,9	6,0	12,0	—

Толщина деталей, мм	Параметры режима					
	установочные					
	C_p , мкФ	U_c , В	k_T	$\omega_{др}$	$F_{э}$, Н	$d_э$, мм
Сталь 12Х18Н9Т						
Машина						
0,1+0,1	30	600	125	—	70	1,0
0,3+0,3	120	600	125	—	200	2,0
0,5+0,5	260	600	125	—	400	2,5
Машина						
0,1+0,1	50	250	50	60	70	1,0
0,2+0,2	100	350	50	80	150	1,5
0,5+0,5	1000	650	150	140	570	3,0
Сталь 12Х18Н9Т						
Машина						
0,1+8,0	80	600	100	—	70	1,0 *
0,3+8,0	200	600	125	—	200	2,0 *
0,5+8,0	400	600	125	—	400	3,0 *
Машина						
0,08+8,0	100	250	50	60	70	1,0 *
0,2+8,0	100	350	100	80	150	1,5 *
0,5+8,0	960	650	150	140	670	2,5 *
Сплав						
Машина						
0,09+0,15	600	300	250	175	250	1,0
0,15+0,15	600	320	250	175	300	1,5
0,3+0,3	800	470	500	175	500	2,0
Бронза БрБНТ1,7 +						
Машина						
0,2+10	50	750	50	100	16	1,5 *
0,3+10	100	950	50	100	22	2,0 *
0,4+10	300	1000	150	100	30	3,5 *

* Диаметр электрода со стороны тонкого листа; со стороны толстого листа $d_э = 10$ мм.

онными покрытиями получают только в случае ее лужения, золочения и серебрения.

Как показали исследования, для микросварки бронзы БрОЦ4-3 требуются примерно такие же режимы, как и для бронзы БрОФ6,5-0,4. Поэтому данные табл. 20 могут служить ориентировочными режимами точечной конденсаторной сварки бронзы БрОЦ4-3 толщиной 0,02—0,5 мм.

Точечная конденсаторная микросварка бериллиевых бронз БрБ2, БрБ2,5, БрБНТ1,7 и БрБНТ1,9 малых толщин на режимах, близких к режимам для указанных выше бронз, уже в течение ряда лет ус-

сварки					$F_{\text{ср}} \cdot H$
технологические					
$I_{\text{под}}$ кА	$I_{\text{св, max}}$ кА	$t_{\text{под}}$ мс	$t_{\text{в}}$ мс	$t_{\text{св}}$ мс	
(равные δ)					
ТКМ-7					
—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—
ТКМ-15					
0,7	1,2	0,5	1,5	2,5	—
0,9	1,9	0,8	1,7	4,0	—
1,3	3,5	1,8	4,5	10,0	—
(неравные δ)					
ТКМ-7					
—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—
—	—	—	—	—	—
ТКМ-15					
0,8	1,2	0,5	1,5	2,5	—
0,9	1,9	0,8	1,7	4,0	—
1,3	3,2	1,8	4,5	10,0	—
36НХТЮ					
ТКМ-15					
1,4	2,4	3,0	5,0	10,0	—
1,4	2,6	3,0	5,0	10,0	—
2,7	3,5	4,0	6,0	12,0	—
латунь Л63					
ТКМ-15					
2,56	7,04	0,8	1,6	4,5	—
3,2	8,2	1,0	2,0	5,0	—
3,5	10,0	1,0	3,0	7,0	—

пешно применяется в приборостроении [137, 142] и обеспечивает хорошее качество соединений. При сварке этих же металлов неравных толщин из-за лучших условий теплоотвода от тонкой детали, значительного растекания тока в толстой детали и увеличения его плотности на краях контакта деталь — деталь зона максимальных температур смещается в толстую деталь, а проплавление тонкой детали значительно уменьшается (вплоть до непровара).

Исследование процесса и условий формирования микросварных листовых соединений из латуни и бронзы показало, что эффективным технологическим приемом, обеспечивающим симметричную относи-

тельно плоскости раздела деталей зону нагрева, являются повышение интенсивности нагрева в начальной стадии за счет уменьшения времени t_a и использование со стороны толстой детали электрода с большей контактной поверхностью, чем со стороны тонкой детали, а в ряде случаев — электрода со сферической поверхностью со стороны тонкой детали.

Ориентировочные режимы точечной конденсаторной микросварки латуни Л63 неравных толщин приведены в табл. 20.

Как известно [135, 137], способом конденсаторной сварки сопротивлением могут выполняться точечные соединения пакетов из трех и более тонких металлических листов. Электрические параметры режима точечной конденсаторной микросварки пакетов из латуни Л63 малых толщин должны несколько снижаться по сравнению с параметрами для этой латуни, приведенными в табл. 20, что объясняется повышением тепловыделения на контактных сопротивлениях деталь — деталь, число которых меньше на единицу числа листов в пакете. Соединения пакетов из тонких металлов получаются с литым ядром, которое охватывает все пластинки, причем средние проплавленияются полностью, а наружные — на 70—80 % толщины.

Точечная микросварка алюминия и его сплавов. Специфичность и трудность контактной сварки алюминия и его сплавов достаточно хорошо известны. Наличие на их поверхности оксидной пленки Al_2O_3 непостоянной величины является главной причиной плохой стабильности процесса. Поэтому перед сваркой оксидную пленку необходимо удалять.

Исследования точечной конденсаторной микросварки алюминия разных марок и его сплавов малых толщин показывают целесообразность применения более жестких по сравнению со сваркой медных сплавов режимов сварки, которые обеспечивают минимальные зоны термического влияния, позволяя тем самым сохранять прочностные и антикоррозионные свойства свариваемых материалов.

На машинах ТКМ-4, ТКМ-7, ТКМ-15 и ТКМ-17 исследована точечная конденсаторная микросварка алюминия и его сплавов (Д16М, Д19М, Д16Т, Д19Т, АМг, АМц, АМг2, АМг5, АМг6, В95Т, О1420 и др.) толщиной 0,1—0,5 мм. Установлена возможность получения прочных соединений не только при сварке этих материалов между собой, но и некоторых их сочетаний (алюминия А97 с дуралюмином Д16Т, алюминия А95 с АМг и др.).

В результате проведенных исследований установлено, что обезжиривание поверхностей свариваемых тонких деталей ацетоном или бензином повышает прочность сварной точки при конденсаторной сварке примерно на 10 %, а также несколько стабилизирует процесс сварки. Путем механической зачистки образцов со стороны примыкания электродов можно повысить прочность точки примерно на 20 % (по сравнению с незачищенными образцами). Механическая зачистка образцов в контакте между ними дает отрицательные результаты, так как при этом снижается контактное сопротивление $R_{ддх}$ и прочность сварных соединений уменьшается. Наиболее рационально производить химическую очистку поверхностей деталей

из алюминия и его сплавов (как толщиной до 0,5 мм, так и 0,6—2,5 мм).

Режимы точечной конденсаторной микросварки алюминия А97 толщиной от 0,1 до 0,5 мм приведены в табл. 20. Механическую прочность сварных точек из алюминия А97 и алюминиевых сплавов можно считать вполне удовлетворительной для большинства случаев их применения в различных конструкциях приборов.

При разработке технологии и выборе параметров режима точечной конденсаторной микросварки алюминиевых сплавов следует также учитывать следующее: усилие сжатия $F_{\text{с}}$ необходимо повышать с увеличением предела текучести сплава (например, при сварке сплава Д16Т усилие $F_{\text{с}}$ должно быть выше, чем у сплава АМц), склонности сплава к выплескам (это относится ко всем термоупрочненным сплавам) и при наличии плакировки на свариваемых деталях.

При микросварке алюминия неравных толщин использование указанных выше приемов для получения сварной точки, симметричной плоскости раздела деталей, в ряде случаев недостаточно, а поэтому увеличение проплавления тонкой детали достигается следующими дополнительными мерами: снижением отвода тепла в электрод со стороны тонкой детали за счет использования рабочей вставки в электрод, изготовленной из металла с малой теплопроводностью, а также введения в контакт между электродом и тонкой деталью теплового экрана (несваривающейся с ней пластинки толщиной 0,1—0,2 мм из металла с высоким электросопротивлением, например нержавеющей стали и др.); увеличением доли тепла $Q_{\text{пл}}$ в общем тепловом балансе за счет уменьшения времени $t_{\text{а}}$ или введения между обеими свариваемыми деталями тонкой фольги из такого же металла (что создает еще одно контактное сопротивление в пакете из двух деталей и фольги).

Точечная микросварка никеля и его сплавов. Конструкционные, электровакуумные, жаропрочные и другие никелевые сплавы малых толщин в основном хорошо свариваются на точечных конденсаторных машинах, однако для них пока не разработаны режимы и технология микросварки в широком диапазоне толщин [60]. Во многом это объясняется тем, что указанные сплавы в большинстве случаев необходимо сваривать с другими металлами и сплавами.

Никель марок Н1, НП1, НП2, НП3, НП4, а также его сплавы хромель (НХ9,5), алюмель (НМц АК2-2-1), копель МНМц43-0,5, константан МНМц40-1,5, нихром Х20Н80, ковар, платинит и др. широко используются в виде листов, лент, проволок и плющенко в приборостроении, электронной технике и машиностроении.

Малое удельное сопротивление, высокая теплопроводность и пластичность никеля обуславливают необходимость использования малых усилий $F_{\text{с}}$, больших токов $I_{\text{св}}$ и малых $t_{\text{св}}$. У никелевых сплавов удельное электрическое сопротивление ρ и предел текучести $\sigma_{0,2}$ существенно выше, чем у чистого никеля, поэтому с ростом ρ и $\sigma_{0,2}$ соответственно уменьшают ток $I_{\text{св}}$ и увеличивают $F_{\text{с}}$.

В табл. 20 приведены режимы точечной микросварки никеля и нейзильбера НМц65-20. Хорошие результаты получены также при микросварке пермаллоя 65НП и элинвара.

При конденсаторной микросварке никеля и его сплавов обеспечиваются вполне удовлетворительные прочность и внешний вид точек. В связи с этим точечную конденсаторную микросварку никеля и его сплавов можно широко использовать в серийном производстве различных изделий.

Точечная микросварка сталей. Малоуглеродистая сталь отличается высокой тепло- и электропроводностью и малой прочностью. Поэтому она сваривается при сравнительно высокой плотности тока $I_{\text{св}}$ (до 600 А/мм²) и малом давлении (50—120 Н/мм²) [49, 52, 67]. Эти стали относительно малочувствительны к термическому циклу и хорошо свариваются как при малых, так и при больших значениях времени t_a и $t_{\text{св}}$.

Малоуглеродистые стали с защитными покрытиями (цинк, олово, никель, хром, кадмий) сваривают при малом времени $t_{\text{св}}$, чтобы меньше повредить покрытия. При непостоянной толщине покрытий качество сварки сталей ухудшается.

На основе исследований [137, 142] установлено, что низкоуглеродистые стали при конденсаторной сварке дают прочные соединения, что также подтверждается анализом их структур. Особенности этого способа — быстрые нагрев и охлаждение деталей между сжатыми электродами — обуславливают образование ядра точки с минимальной зоной влияния, что обеспечивает высокие показатели прочности и пластичности соединения.

Наиболее полно была исследована [137, 142] точечная конденсаторная сварка стали 10 толщиной от 0,05 + 0,05 до 0,8 + 0,8 мм (см. табл. 20). При этом установлено, что прочность точек на стали 10 очень высокая и достигает значений порядка 50—100 Н на точку для толщины 0,05 + 0,05 мм и около 1700 Н для толщины 0,8 + 0,8 мм. При конденсаторной микросварке среднеуглеродистых и низколегированных сталей образуются закалочные структуры, что в ряде случаев обуславливает образование трещин, пор, а также низкую пластичность соединений.

Для получения из этих материалов микросварных соединений удовлетворительного качества необходимо снизить скорость охлаждения, что достигается последующей термической обработкой (отпуском) зоны соединения между электродами путем включения тока термообработки $I_{\text{то}}$. Машина МТК-2001 для точечной конденсаторной микросварки, обеспечивающая выполнение операции термообработки, подготовлена к серийному производству.

За послевоенные годы область применения коррозионно-стойких и жаропрочных сталей достигла весьма значительных размеров и продолжает расширяться, охватывая все новые отрасли промышленности. В числе внедренных способов сварки этих сталей можно назвать конденсаторную микросварку, которая обеспечивает отличное качество соединения из тонких коррозионных сталей многих марок. В первую очередь это относится к точечной конденсаторной сварке стали 12Х18Н9Т толщиной до 0,8 мм.

Высокое качество соединений из ряда марок коррозионно-стойких сталей малой толщины, получаемых при точечной конденсаторной

Таблица 21. Ориентировочные режимы точечной микросварки стали 12Х18Н9Т на бестрансформаторной машине и разрывные усилия F_p на точку

Толщина деталей, мм	Параметры режима сварки			$F_{p \text{ min}} - F_{p \text{ max}}$ $F_{p \text{ ср}}$
	C_p , мкФ	$t_{\text{св}}$, "	$d_{\text{св}}$, мм	
0,1+0,1	8500	12,0	1,0	$\frac{214-224}{225}$
0,2+0,2	16 500	15,0	1,5	$\frac{450-485}{474}$
0,4+0,4	20 000	30,5	1,5	$\frac{925-1115}{1010}$

Примечание. $U_c = 100$ В.

сварке, в первую очередь объясняется малым временем $t_{\text{св}}$, что, как известно, весьма благоприятно для контактной сварки указанных сталей. При этом предотвращается выпадение карбидов хрома и, следовательно, возможность возникновения межкристаллитной коррозии (для сталей без стабилизирующих присадок), а также уменьшаются сварочные деформации, коробление и зона разупрочнения свариваемого металла.

Точечные конденсаторные машины малой мощности обеспечивают высокопрочные соединения аустенитной стали 12Х18Н9Т толщиной от 0,05 + 0,05 до 0,7 + 0,7 мм (см. табл. 20). Так, при сварке указанной стали на машине ТКМ-7 прочность точек на разрыв достигает около 200 Н для толщины 0,1 + 0,1 мм и 780 Н для толщины 0,5 + 0,5 мм. Еще более высокие результаты вследствие увеличения диаметра ядра сварной точки получаются при сварке стали 12Х18Н9Т на машине ТКМ-15.

На бестрансформаторной конденсаторной машине ТКБ-1 были проведены успешные исследования по точечной микросварке сопротивлением стали 12Х18Н9Т (табл. 21). Данные таблицы свидетельствуют о том, что этот способ конденсаторной сварки обеспечивает получение высокопрочных точечных соединений из этой и других сталей данного класса малых толщин.

Хорошие результаты получены и при конденсаторной микросварке коррозионностойких и жаропрочных сталей неравных толщин (см. табл. 20).

Точечная конденсаторная микросварка других металлов. Титан и его сплавы малых толщин и сечений хорошо свариваются на точечных конденсаторных машинах. Режимы микросварки этих металлов и коррозионностойких сталей мало отличаются между собой, поскольку они имеют близкие теплофизические свойства. В ряде случаев при конденсаторной микросварке высокопрочных титановых сплавов целесообразно производить повторный нагрев точки (термообработку) током $I_{\text{то}}$, составляющим (0,6—0,9) $I_{\text{св}}$, что позволяет исключить образование закалочных структур. Кратковременность процесса

Таблица 22. Ориентировочные режимы точечной микросварки ниобия НЭ1 в рельефно-точечной микросварки проволок из сплавов ВР5 и ВР20

Металл	Толщина (диаметр) детали, мм	$I_{\text{под}}$, кА	$I_{\text{св макс}}$, кА	$t'_{\text{под}}$, мс	t_a , мс	$t_{\text{св}}$, мс	F_a , Н	d_a , мм
НЭ1	$\delta = 0,5 \pm 0,5$	0,6	1,54	1,7	3,5	6,0	300	3,0
НЭ1	$\delta = 0,5 \pm 0,5$	0,6	1,92	1,7	3,5	6,0	300	3,0
ВР5 + ВР20	$d = 0,2 \pm 0,2$	0,3	0,5	2,0	4,8	6,0	60	2,0

Примечание. В опытах по сварке ниобия НЭ1 соединения при меньшем токе $I_{\text{св макс}}$ получались в твердом состоянии, а на большем токе — с литым ядром.

конденсаторной микросварки, а при соединении листовых материалов изолированность металла в ядре точки от атмосферного воздуха позволяют, в отличие от сварки плавлением, получить высококачественные соединения даже без защиты зоны микросварки инертным газом.

При точечной контактной сварке тугоплавких металлов, таких, как ниобий, молибден и вольфрам, рекомендуется [11, 64, 68, 69] наносить карандашом на поверхность свариваемого металла со стороны электродов тонкий слой графита (что позволяет предотвратить схватывание металла электродов с поверхностью металла) или помещать между электродом и свариваемым материалом прокладку из молибдена [10]. Однако в ряде случаев использование этих приемов может технологически оказаться недопустимым. Поэтому авторами была проведена работа по выбору электродных материалов, отличающихся малой склонностью к взаимодействию с тугоплавкими металлами (при точечной конденсаторной микросварке). Хорошие результаты при микросварке ниобия были получены при использовании рабочих вставок в электроды из дисперсно-упрочненной меди с добавками оксидов циркония [71, 149].

Оптимальные режимы микросварки ниобия толщиной 0,5 мм приведены в табл. 22.

Металлографические исследования образцов сварных точек ниобия показали, что в случае образования литого ядра размеры столбчатых кристаллитов в его центре достигают 250 мкм, а в околошовной зоне — не более 100 мкм. Измерениями микротвердости установлено, что точечные сварные соединения имеют в зоне нагрева несколько пониженную твердость (по сравнению с основным металлом). Содержание примесей кислорода и водорода в зоне соединения при микросварке ниобия как в твердом состоянии, так и с литым ядром составляло $O_2 \leq 0,0035\%$; $H_2 \leq 0,0004\%$. Разрушение микросварных соединений из ниобия при их испытании на срез проходило по зоне термического влияния, причем прочность точек составляла около 500 Н. Данные испытаний таких соединений на изгиб подтвердили их хорошую пластичность (угол загиба 180° , число перегибов 4—5).

При точечной конденсаторной микросварке вольфрама необходимо применять промежуточные прокладки толщиной 0,1—0,15 мм из никеля или тантала [68], а при микросварке молибдена — из титана, меди [69, 121]. Использование таких тонких металлических прокладок

позволяет, с одной стороны, повысить контактное сопротивление $R_{\text{дд}}$, а следовательно, и долю тепла $Q_{\text{дд}}$ в общем тепловом балансе зоны микросварки, с другой — уменьшить тепловыделение в контактах электрод — деталь и подлипание электродов к поверхности свариваемых деталей.

При рельефно-точной конденсаторной микросварке проволок из вольфрама или его сплавов целесообразно использовать втулки и скобки из никеля толщиной 0,05—0,10 мм. Перед микросваркой концы указанных проволок заводят во втулки или внутрь скобок (см. рис. 67, в, г) и обжимают пинцетом.

Режимы конденсаторной микросварки проволок из вольфрамовых сплавов ВР5 и ВР20 с предварительным зажатием их концов в скобки из никеля НП2 толщиной 0,09 мм также приведены в табл. 22. Результаты прочностных испытаний этих микросварных соединений показали вполне удовлетворительное их качество.

Широкое использование в приборостроении получают прецизионные сплавы с особыми упругими свойствами. В этой группе насчитывается около 10 сплавов [200], основой которых являются хром, никель и железо. Большинство этих сплавов предназначено для изготовления упругих чувствительных элементов (мембраны, диафрагмы, датчики давления и др.) различных приборов, многие из которых работают при температуре 200—300 °С, причем в таких условиях должны сохраняться как их упругие свойства, так и требуемые показатели качества сварных соединений [243, 244].

Из указанных прецизионных сплавов наиболее широко применяются такие сплавы, как 36НХТЮ и 42НХТЮ, которые хорошо свариваются на точечных конденсаторных машинах (см. табл. 20). Для этих сплавов характерны большие значения $\sigma_{0,2}$ в нагретом состоянии, что обуславливает использование повышенных усилий $F_{\text{с}}$ и большего времени $t_{\text{св}}$, чем при микросварке коррозионностойких сталей.

В настоящее время при изготовлении ювелирных изделий широко используется серебро, которое удовлетворительно сваривается на точечных конденсаторных машинах малой мощности, при использовании (из-за высокой тепло- и электропроводности серебра) электродов со вставками из вольфрама и молибдена. Высокая пластичность серебра обуславливает также необходимость использования малых $F_{\text{с}}$ и $t_{\text{св}}$ [61].

Для уменьшения подлипания при сварке рабочих частей электродов к поверхности серебра целесообразно использовать прокладки из молибдена толщиной 0,1—0,2 мм, помещаемые между электродом из медных сплавов и свариваемым металлом.

9. Микросварка разнородных металлов

Известно, что при контактной сварке металлов равных и неравных толщин [49, 52] с различными теплофизическими свойствами трудно получить ядро точки, симметрично расположен-

ное относительно плоскости раздела свариваемых деталей. Обычно ядро сварной точки смещается в деталь большей толщины, а также в материал, который имеет меньшую теплопроводность, большее электрическое сопротивление и более низкую температуру плавления. При этом характер формирования сварной точки во многом определяется величиной, формой и длительностью импульса сварочного тока; теплоотводом в основной металл и электроды; влиянием эффектов Пельтье и Томсона [110, 112, 137]; соотношением толщин и теплофизическими свойствами свариваемых металлов; материалом, формой и размерами контактных поверхностей рабочих частей электродов.

Теоретический анализ показывает, что для микросварки металлов с различными теплофизическими свойствами наиболее целесообразно применять кратковременные однополярные импульсы сварочного тока, которые довольно просто можно получить при трансформированном разряде конденсаторов.

Сказанное объясняется следующими факторами:

1. Малое время $t_{\text{св}}$ при конденсаторной сварке обуславливает высокие скорости нагрева (сотни тысяч градусов в секунду) и должно приводить к формированию точек с ядром, симметрично расположенным относительно плоскости раздела свариваемых металлов, так как в этом случае в значительной мере успевает проявиться роль тепловыделения на контактном сопротивлении $R_{\text{дд}}$, а влияние собственного сопротивления деталей оказывается менее существенным, чем при сварке с более продолжительными $t_{\text{св}}$ (при мягкой режиме).

2. Незначительное влияние теплоотвода в основной металл и электроды при жестких режимах сварки также способствует формированию симметричного ядра точки.

3. Однополярный характер импульса тока при конденсаторной сварке позволяет полезно использовать для соединения металлов неравных толщин эффект Пельтье.

При точечной конденсаторной микросварке разнородных металлов неравных толщин в большинстве случаев решающими факторами при выборе параметров процесса являются толщина и теплофизические свойства более тонкой из свариваемых деталей. В то же время толщина более толстой детали часто существенной роли не играет и практически может составлять от одного-двух до многих десятков миллиметров.

Параметры режима точечной конденсаторной микросварки разнородных металлов равных толщин определяются в основном металлом, который имеет большую теплопроводность, меньшее электросопротивление и более высокую температуру плавления.

Для получения качественных соединений при микросварке разнородных металлов неравных и равных толщин необходимо выбирать режимы с учетом следующих основных рекомендаций: со стороны тонкой детали применять электрод примерно с такими же размерами, как и при точечной сварке металлов равных толщин; со стороны детали большей толщины устанавливать электрод с развитой контактной поверхностью, что сводит к минимуму выделение тепла в контакте электрод — деталь; усилие сжатия устанавливать по толщине более

тонкой детали; устанавливать со стороны тонкой детали (особенно, если она изготовлена из материала с теплоэлектропроводностью и температурой плавления выше, чем материал толстой детали) электрод с рабочей вставкой из материала с малой теплопроводностью; вводить при необходимости в контакт между электродом и тонкой деталью тепловой экран из металлической фольги (толщиной 0,1—0,2 мм) с высоким электросопротивлением; применять со стороны тонкой детали электрод со сферической поверхностью; увеличивать при необходимости долю тепла $Q_{\text{дд}}$ в общем тепловом балансе за счет уменьшения времени t_a и введения в контакт деталь — деталь тонкой (0,05—0,15 мм) фольги из свариваемых металлов; устанавливать следующую полярность: плюс — на тонкой детали, минус — на толстой. В табл. 23 приведены ориентировочные режимы точечной и рельефно-точечной конденсаторной микросварки узлов из разнородных металлов. Здесь недопустимы выплески, пережоги, следы электродного материала на поверхности деталей [84], поэтому использовались термические циклы с подогревом деталей разрядным током конденсаторов.

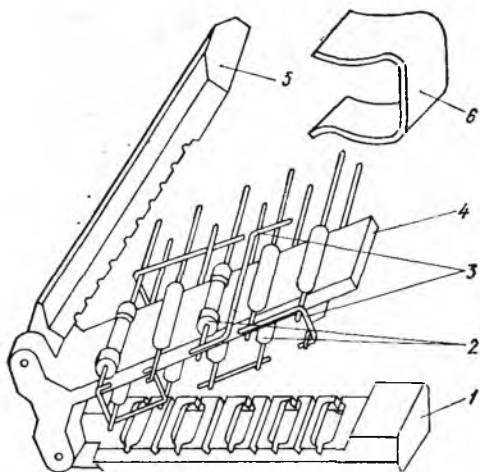


Рис. 68. Приспособление для рельефно-точечной конденсаторной микросварки модулей.

Сборка и микросварка этих и других узлов [5] выполняются в большинстве случаев с помощью специальных приспособлений. Так, при микросварке функциональных модулей [172] радиоэлементы 2 (рис. 68) укладываются сначала в гнезда нижней кассеты 1 приспособления и прижимаются обрезиненной планкой 4, а затем — в гнезда верхней кассеты 5, прижимаются другой стороной планки 4 (не нарушая при этом расположения элементов 2 в нижней кассете) и фиксируются вилкой 6. После этого сначала свариваются детали, уложенные в нижней кассете, а затем — в верхней. В качестве соединительных перемычек 3, которые свариваются с выводами элементов 2, используется проволока диаметром 0,4—0,5 мм или лента сечением 0,2 × 0,9 мм из никеля НП2. Для удобства выполнения сварки соединительные перемычки проходят операции отрезки и гибки, после чего укладываются в специальные пронумерованные лотки.

Конструкции разработанных и используемых в промышленности сварочных приспособлений для сборки и конденсаторной микросварки различных узлов указанных выше изделий обеспечивают фиксацию и взаимное расположение свариваемых деталей друг относительно друга с требуемой точностью и исключением зазоров в зоне соедине-

Таблица 23. Ориентировочные режимы микросварки узла изделий из различных

Свариваемые материалы (δ и d , мм)	Пара устано				
	C_p , мкФ	$U_{\text{спод}}$, В	$U_{\text{св}}$, В	k_T	$F_{\text{э}}$, Н
Электровacuумные					
Алюминированное железо, $\delta = 0,1 + \text{никель НП2}$, $\delta = 0,05 \times 2$	300	160	300	120	30
Никель НП2, $\delta = 0,05 + d = 0,4$	300	160	300	120	32
Никель НП2, $\delta = 0,1 + d = 0,4$	300	160	300	120	33
Никель НП2 (золоченый), $d = 0,3 + \text{платинит}$, $d = 0,4$	250	190	300	160	30
Никель НП2, $d = 0,4 + \text{платинит}$, $d = 0,4$	250	190	300	160	34
Сплав А, $\delta = 0,05 \times 2 + \text{платинит}$, $d = 0,4 + \text{сплав Н42}$, $\delta = 0,05$	250	160	300	120	30
Платинит, $d = 0,4 + \text{никель НП2}$, $\delta = 0,05 \times 2 + \text{вольфрам ВР20}$, $d = 0,045$	150	180	220	160	30
Алюминированное железо, $\delta = 0,1 \times 2 + \text{платинит}$, $d = 0,4$	500	170	280	80	40
Никель НП2, $\delta = 0,1 + 0,12$	300	160	300	120	40
Никель НП2, $\delta = 0,1 \times 2 + \text{сплав Н42}$, $\delta = 0,1$	300	160	340	120	40
Никель НП2, $\delta = 0,1 \times 2 + \text{сплав Н42}$, $\delta = 0,1$	300	160	340	120	40
Сплав Н42, $d = 0,2 + \text{ковар Н29К18}$, $d = 1,0$	200	140	250	160	40
Вольфрам ВР20, $d = 0,028 + \text{платинит}$, $\delta = 0,1 \times 2$	200	140	250	160	40
Функциональные модули					
Медь М1 (серебряная), $d = 0,5 + \text{никель НП2}$, $d = 0,5$	500	140	320	80	50
Ковар Н29К18, $d = 0,3 + \text{никель НП2}$, $d = 0,4$	250	130	240	120	45
Ковар Н29К18, $d = 0,5 + \text{медь М1}$, $d = 0,5$	500	150	360	80	50
Медь М1 (серебряная), $d = 0,5 + d = 0,5$	500	160	340	80	50
Бронза БрБ2,5 (серебряная), $d = 0,4 + \text{ковар Н29К18}$ (золоченый), $\delta = 0,1$	500	140	320	80	45
То же (крестообразное соединение)	250	140	290	120	45
Медь М1 (хромированная), $\delta = 0,1 + \text{ковар Н29К18}$, $\delta = 0,5$	250	140	320	120	45
Микро реле, микроак					
Бронза БрБНТ1,7, $\delta = 0,15 + \text{сплав СpНМ2-20}$, $\delta = 0,8$	400	—	560	120	50
Сплав Зл-Ср-Мг-Н2-97, $\delta = 0,1 + \text{мельхиор МН19Т}$, $\delta = 0,15$	400	—	510	80	30

разнородных металлов на машинах ТКМ-14, ССП-3 и МТК-501

метры

вочные				технологические				
Электроды				$I_{\text{под}}, \text{KA}$	$I_{\text{свтаж}}, \text{KA}$	$t_{\text{под}}, \text{мс}$	$t_{\text{св}}, \text{мс}$	$t_{\text{пауз}}, \text{мс}$
верхний		нижний						
$M_{\text{В}}$	$d_{\text{э}}, \text{мм}$	$M_{\text{Н}}$	$l_{\text{э}}^*, \text{мм}$					

приборы

Мц5Б	1,0	Мц5Б	2,0	0,28	0,70	7,0	5,0	50
Мц5Б	1,0	Мц5Б	2,0	0,67	1,35	7,5	4,5	50
Мц5Б	1,0	Мц5Б	2,0	0,67	1,63	7,5	4,5	50
Мц5Б	1,5	Мц5Б	2,0	0,83	1,60	7,5	4,1	50
Мц5Б	1,5	Мц5Б	2,0	0,83	1,57	7,5	4,1	50
Мц5Б	1,5	Мц5Б	2,0	0,77	1,67	7,5	4,2	50
Мц5Б	1,5	Мц5Б	2,0	0,40	0,87	7,5	4,9	50
Мц5Б	1,5	Мц5Б	2,0	0,73	1,67	6,1	5,0	50
Мц5Б	1,5	Мц5Б	2,0	1,10	2,37	7,0	4,5	50
Мц5Б	1,5	Мц5Б	2,0	1,20	2,57	7,0	4,5	50
Мц5Б	1,5	Мц5Б	2,0	1,20	2,57	7,0	4,5	50
Мц5Б	1,5	Мц5Б	2,0	0,50	0,90	5,0	7,5	50
Мц5Б	1,5	Мц5Б	2,0	0,70	1,27	7,0	5,5	50

и микросхемы

Мо	1,5	Мц5Б	2,0	0,67	1,80	6,5	4,0	50
Мц5Б	1,5	Мц5Б	2,0	0,63	1,00	6,0	4,0	50
Мо	1,5	Мц5Б	2,0	0,83	1,83	6,5	4,0	50
Мо	1,5	Мо	1,5	1,73	4,00	6,0	4,0	50
Мц5Б	1,5	Мц5Б	2,0	2,07	4,67	5,1	4,5	50
Мц5Б	1,5	Мц5Б	2,0	1,23	2,70	6,5	5,6	50
Мо	1,5	Мц5Б	2,0	0,85	1,56	6,0	4,1	50

кумуляторы, разъемы

Мц5Б	2,0	МКВ-50	Спец.	2,40	3,80	2,0	3,5	—
Мц5Б	2,0	МКВ-50	Спец.	2,30	4,30	1,0	1,5	—

Свариваемые материалы (δ и d , мм)	Пара				
	устано				
	C_p , мкФ	$U_{\text{спод}}$, В	$U_{\text{св.}}$, В	k_T	$F_{\text{э.}}$, В
Бронза БрКМц3-1, $\delta = 0,15 +$ + БрКМц3-1, $\delta = 0,8$	400	—	640	120	50
Никель НП2, $d = 0,4 +$ никель НП2 (гофрированный), $\delta = 0,1$	300	180	300	80	33
Ковар Н29К18, $d = 0,6 +$ никель НП2, $\delta = 0,5 \times 2 +$ провод ГФ-100, сечение 0,35	250	150	300	120	33
Ковар Н29К18, $d = 0,6 +$ никель НП2, $\delta = 0,05 \times 2 +$ провод ГФ-100, сечение 0,25	250	140	260	120	30
Микрорезисторы, автограф					
Провод Н60ГХ (в стеклянной изоляции), $d = 0,014 +$ латунь Л62 (никелированная), $\delta = 0,3$	45	160	250	80	10
Провод Н60ГХ (в стеклянной изоляции), $d = 0,005 +$ латунь Л62 (никелированная), $\delta = 0,3$	45	100	200	80	10
Провод ПЭЛ, $d = 0,15 +$ никель НП2, $\delta = 0,05 \times 2 +$ ковар Н29К18, $d = 0,6$	250	140	260	120	30
Провод ПЭВ, $d = 0,35 +$ никель НП2, $\delta = 0,05 \times 2 +$ ковар Н29К18, $d = 0,6$	250	230	330	120	30
Провод ПЭВ, $d = 0,11 \times 4 +$ ни- кель НП2, $\delta = 0,05 \times 2 +$ ко- вар Н29К18, $d = 0,7$	250	180	270	120	30

* Контактная поверхность этого электрода — плоская, горизонтальная и продолгова

ния; свободный доступ электродов к месту сварки; быструю загрузку деталей и съем сваренного узла; исключение шунтирования сварочного тока; надежный токоподвод к свариваемым деталям и др.

Опыт показывает, что узлы и детали приспособлений, которые располагаются в сварочном контуре маломощной конденсаторной машины, следует изготавливать из немагнитных материалов¹. Фиксация в таких приспособлениях свариваемых деталей в большинстве случаев осуществляется по наружному контуру последних или путем использования отверстий, пазов и рельефов на этих деталях.

Анализ качества выполнения на указанных режимах (см. табл. 23) микросварных соединений из тонких разнородных металлов и результаты их металлографических исследований, механических и других испытаний показали, что разработанная авторами данной моногра-

¹ Как известно [52, 175], введение ферромагнитных масс в сварочный контур обуславливает уменьшение сварочного тока, что дестабилизирует процесс сварки.

метры								
вочные				технологические				
Электроды				$I_{\text{под}}$, кА	$I_{\text{свmax}}$, кА	$t_{\text{под}}$, мс	$t_{\text{св}}$, мс	$t_{\text{пауз}}$, мс
верхний		нижний						
$M_{\text{в}}$	$d_{\text{э}}$, мм	$M_{\text{н}}$	$l_{\text{э}}^*$, мм					
Мц5Б	2,0	Мо	Спец.	2,50	3,90	2,0	3,5	—
Мц5Б	1,5	Мц5Б	2,0	0,80	1,65	7,5	4,2	50
Мц5Б	1,5	Мц5Б	2,0	0,50	1,10	7,5	4,0	50
Мц5Б	1,5	Мц5Б	2,0	0,49	0,96	7,9	4,0	50
торные приборы								
Мц5Б	0,5	Мц5Б	Спец.	0,07	0,18	0,7	1,0	20
Мц5Б	0,5 0,5	Мц5Б	Спец.	0,05	0,13	0,6	1,0	20
Мц5Б	1,5	Мц5Б	2,0	0,49	0,94	7,9	4,0	50
Мц5Б	1,5	Мц5Б	2,0	1,10	2,40	7,0	4,0	50
Мц5Б	1,5	Мц5Б	2,0	0,85	1,80	7,2	4,0	50

тая площадка шириной l_a .

фии и широко внедренная в промышленность технология точечной и рельефно-точечной конденсаторной микросварки позволяет значительно снизить брак по выплескам, непроварам, пережогам, следам электродного материала и другим дефектам (не более 0,1 %), а также повышает качество и надежность соединений. При механических испытаниях на разрыв разрушение микросварного соединения происходит, как правило, по основному металлу при довольно высоком значении разрушающего усилия F_p , значительно превышающем конструктивную прочность узла (см. табл. 12).

Требования повышенной плотности монтажа и уменьшения габаритов узлов в современной радиоэлектронной аппаратуре обуславливают максимальное приближение мест сварки к корпусам полупроводниковых приборов и микросхем. Для определения минимального расстояния места сварки перемычек с выводами этих изделий от их корпусов были измерены основные параметры полупроводниковых приборов и микросхем до и после рельефно-точечной конденсаторной

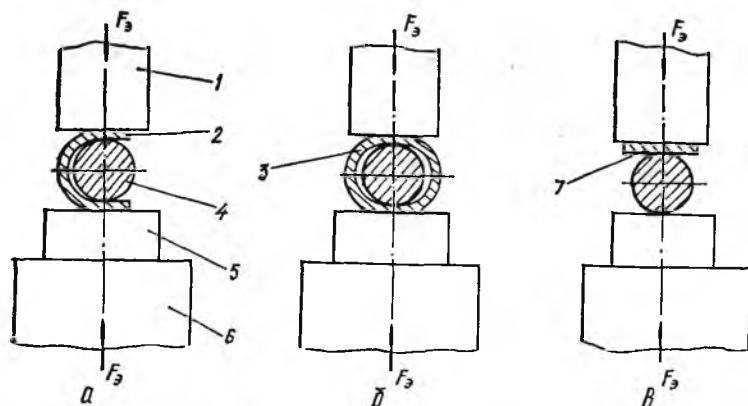


Рис. 69. Схемы точечной конденсаторной микросварки проводов в изоляции с элементами конструкций изделий.

микросварки. Установлено, что даже при расстоянии места сварки около 0,2—0,5 мм (от корпусов) параметры полупроводниковых приборов и микросхем после выполнения указанной операции не изменялись.

В различных отраслях промышленности (радиоэлектронной, автомобильной, электротехнической и др.) соединение проводов в изоляции с элементами конструкций изделий осуществляется пайкой [170]. К основным недостаткам этого способа относятся большое количество обрывов проводов вследствие снижения механической прочности паяных соединений в местах зачистки изоляции, а также значительная трудоемкость таких операций, как снятие изоляции, обезжиривание и удаление остатков флюса.

Способ термокомпрессионной сварки [170] проводов в лаковой или стеклянной изоляции (без предварительной зачистки изоляции) применим только в том случае, если конец второй детали из металла другой марки (без изоляции) можно изогнуть в крючок и в его полость ввести микропровод.

Известен также способ контактной сварки проводов с термомеханическим разрушением изоляции. В этом случае сварочный электрод, примыкающий к проводу в изоляции, выполняют из двух частей, соединенных между собой только у рабочего конца. От дополнительного источника питания через этот электрод пропускают электрический ток, разрушающий изоляцию в месте контакта этого электрода с поверхностью провода. Затем дополнительный источник отключается и сварочный ток пропускают через верхний и нижний электроды. Недостатком этого способа являются нестабильность процесса вследствие загрязнения электрода остатками изоляции, а также снижение механических характеристик микропровода из-за длительного нагрева узла в процессе снятия изоляции.

Сущность другого способа [42] контактной микросварки микропроводов в изоляции с элементами конструкций заключается в следующем.

Свободный конец провода 4 зажимается в металлической скобке 2 (рис. 69, а) или трубочке 3 (рис. 69, б), материал и геометрические размеры которых выбираются в зависимости от диаметра провода в изоляции и теплофизических свойств свариваемых деталей 4, 5. После этого детали устанавливают между электродами 1, 6 и сваривают по комбинированному термическому циклу подогрев — сварка.

Такое техническое решение обеспечивает в начальный момент сварки прохождение тока подогрева только через скобку 2 (или трубочку 3) и деталь 5. В результате нагрева скобки (трубочки) изоляция на проводе в местах его контактирования со скобкой (трубочкой) разрушается и при этом появляется электрический контакт между проволокой 4 и деталью 5. Дальнейшее прохождение сварочного тока через зону нагрева обеспечивает получение неразъемного соединения.

При сварке микропровода в стеклянной изоляции целесообразно вместо трубочки использовать металлическую плющенку 7 (рис. 69, в), помещаемую между электродом 1 и микропроводом 4. При сжатии между электродами микропровода и плющенки стеклянная изоляция частично разрушается и появляется контакт между проводом и деталями. Однако в этом случае из-за значительного разброса значений сопротивления $R_{з.сх}$ сварку необходимо выполнять только с подогревом. Применение указанных технологических приемов позволяет устранить загрязнение рабочего конца электрода изоляционным материалом и, следовательно, повысить стабильность процесса.

Как показали наши технологические исследования [34], при сварке микропроводов в изоляции необходимо тщательно выбирать оптимальное значение усилия сжатия $F_з$ (если оно велико, то наблюдается недопустимая деформация провода) и поддерживать его стабильным. Оптимальная величина усилия $F_з$ при сварке микропроводов в стеклоизоляции с использованием плющенки в качестве технологической прокладки должна выбираться также и с учетом обеспечения хорошего металлического контакта в зоне сварки, поскольку в противном случае соединение деталей не получается. Так, при разработке технологии сварки микропроводов в стеклоизоляции диаметром до 20 мкм с токовыводами в микроминиатюрных резисторах надежное контактирование металлической жилы микропровода с плющенкой и токовыводом наблюдалось при усилии $F_з \geq 7,5$ Н (однако при $F_з \geq 12,5$ Н металлическая жила недопустимо деформировалась).

Оптимальные режимы конденсаторной микросварки проводов в изоляции с элементами конструкции по указанной технологии приведены в табл. 23.

Сущность другого способа конденсаторной микросварки микропроводов [153] заключается в том, что на детали, свариваемой с проводом, выполняют паз глубиной, превышающей в 1,2—3 раза и шириной — в 1,2—1,5 раза диаметр провода (см. рис. 67, к и его описание).

Металлографические исследования и результаты испытаний (прочностные¹, электрические и др.) показали, что конденсаторная микро-

¹ Прочность на разрыв микросварного соединения отличалась от прочности провода не более чем на 10 %.

сварка проводов в изоляции с деталями из различных металлов и сплавов обеспечивает получение качественных соединений.

Хорошие результаты получены и при микросварке по указанной выше технологии многожильных проводов с элементами конструкций приборов, выполненных из никеля, кобальта, меди и латуни.

Сварные монтажные соединения успешно прошли испытания на вибронгрузку, повышенные температуры, удары, повышенный срок службы и пр.

Внедрение предлагаемых способов значительно повышает надежность приборов, исключает трудоемкие операции, позволяет отказаться от использования припоев, заметно снижает массу изделий и повышает процент выхода годных изделий.

Широкое применение нашла точечная конденсаторная микросварка разнородных металлов малых толщин при изготовлении чувствительных элементов приборов (мембран, сильфонов и др.). В табл. 20 приведены режимы точечной конденсаторной микросварки этих узлов из бронзы БрБНТ1, 7 и латуни Л63.

При микросварке на приведенных в табл. 23 режимах разрывные усилия как при вырыве, так и при вязком срезе точек практически одинаковы, их абсолютные значения довольно высокие.

В различных отраслях промышленности получила применение конденсаторная микросварка штифтов диаметром 1,0—2,5 мм и длиной 2—3 мм с плоскими деталями толщиной 0,1—3,0 мм. Во всех случаях штифты изготавливались с тщательной подготовкой их торцов. Данные испытаний на разрыв сварных образцов показывают, что они имели высокую прочность (например, разрушающее усилие сварного соединения штифта диаметром 2 мм, приваренного к стали Ст3 толщиной 0,35 мм, составляло около 80 Н). При разрыве образцов штифт, как правило, вырывался в месте сварки из плоской детали, а в детали образовывалось рваное отверстие (при ее толщине до 0,1—0,35 мм).

В последнее время в связи с миниатюризацией полупроводниковых приборов, микросхем, радиоэлектронной аппаратуры и др., несомненно, перспективна [30, 87, 238] точечная и рельефно-точечная конденсаторная микросварка с односторонним подводом тока (см. рис. 61, а, 66, з, 67, б). Этим способом могут успешно выполняться соединения проволочных и плоских выводов из золота, меди, серебра и никеля диаметром (или толщиной) 20—200 мкм с контактными площадками в виде пленок из золота, меди, никеля, серебра, тантала толщиной 0,5—30 мкм, нанесенных на различные диэлектрические подложки (кроме того, и на поверхность пленок могут наноситься разные металлопокрытия). Однако большинство из указанных выше металлических пленок не обладает достаточной адгезией по отношению к диэлектрическим материалам подложек, поэтому на поверхность последних наносят подслои из хрома, молибдена и титана толщиной $(2 \div 5) \cdot 10^{-2}$ мкм.

Существенными особенностями процесса точечной микросварки выводов с контактными площадками являются следующие: весьма значительные доли тепла $Q_{\text{дд}}$ и $2Q_{\text{вд}}$ в общем тепловом балансе зоны

Таблица 24. Ориентировочные режимы точечной микросварки в монтажных условиях на машине К-718

Свариваемые металлы (δ , мм)	Параметры режима сварки										
	установочные					технологические					
	C_p , мкФ	U_c , В	k_T	$w_{др}$	$F_{э}$, Н	$d_{э}$, мм	$I_{под}$, кА	$I_{св\ max}$	$t_{под}$, мс	t_a , мс	$t_{св}$, мс
Сталь 08Х22Н6Т, $\delta = 2,0$ + сталь 12Х18Н9Т, $\delta = 0,1$	200	360	50	60	40	1,5	0,6	1,0	0,8	2,0	4,0
Сталь 08Х22Н6Т, $\delta = 4,0$ + сталь 12Х18Н9Т, $\delta = 0,2$	200	570	100	60	50	1,5	0,6	1,44	0,8	2,5	6,0
Сплав ОТ4, $\delta = 3,0$ + сплав ВТ4, $\delta = 0,2$	200	440	50	60	50	1,5	0,6	1,2	0,8	1,5	4,0
Сталь 08Х22Н6Т, $\delta = 10$ мм + никель Н1М, $\delta = 0,1$ мм	200	450	50	60	40	1,5	0,6	1,6	0,8	2,0	4,2

сварки из-за высоких абсолютных значений $R_{длх}$ и $2R_{эдх}^1$; низкая стабильность выделения тепла на участках деталь — деталь и электроды — детали вследствие большого диапазона разбросов $\pm \Delta R_{длх}$ и $\pm \Delta 2R_{эдх}$ что часто обуславливает как непровары, так и разрушение контактных площадок и пережог выводов; появление трещин и сколов в подложках при большой крутизне нарастания температур в зоне нагрева.

Для исключения указанных выше дефектов необходимо увеличивать теплоотвод от контактных площадок путем установки электродов из медных сплавов с развитой контактной поверхностью; уменьшать теплоотвод со стороны выводов, применяя электроды из вольфрама или псевдосплава вольфрам — медь — серебро.

С учетом изложенного на основе поисковых исследований установлено, что подогрев деталей в зоне соединения должен осуществляться несколькими (не менее 3—5) возрастающими по амплитуде (от 0,3 до 0,7 значения $I_{св\ max}$) импульсами тока $I_{под}$ длительностью 0,6—1,0 мс при повышенной частоте следования (300—800 Гц), а сварка — аналогичными импульсами тока $I_{св}$, отличающимися от подогревных только более высокой амплитудой.

Данный цикл нагрева зоны микросварки проводов с контактными площадками обеспечивает получение высококачественных сварных соединений. При этом разрывное усилие последних лишь незначитель-

¹ Это обусловлено очень малыми усилиями $F_{э}$ (0,3—2,0 Н) и небольшими размерами контактных площадок (например, $0,2 \times 0,8$ мм).

но отличается от такого же усилия менее прочной из соединяемых металлических деталей, что вполне допустимо.

Для ряда важных производств представляет большой интерес точечная микросварка в монтажных условиях разнородных жаропрочных металлов и сплавов неравных толщин, например, для приварки выводных концов датчиков к массивным конструкциям. Сложная форма и большие габариты последних, а также трудный доступ к местам сварки обуславливают применение односторонней схемы сварки. Основным критерием для определения оптимальных режимов сварки указанных соединений (табл. 24) является получение симметричного относительно плоскости раздела деталей литого ядра точек [164]. При этом со стороны тонкой детали должна использоваться сферическая форма рабочей части электрода [49, 52]. Применение электродов с плоской контактной поверхностью их рабочих частей в условиях монтажной сварки нежелательно, поскольку перекос таких электродов обуславливает изменение величины площадок их контактирования с деталями и появление неисправимого брака по сварке.

Результаты механических испытаний образцов на разрыв показывают весьма высокое качество монтажной конденсаторной сварки исследованных металлов неравных толщин. Эти результаты практически не отличаются от результатов испытаний сварных соединений, выполненных в стационарных условиях.

В заключение следует отметить, что технология конденсаторной микросварки разнородных металлов и сплавов в монтажных условиях с помощью различных типов микросварочного инструмента (клещи, пинцет, карандаш, пистолет и др.) широко и успешно внедрена в электронной технике при изготовлении приборов различного назначения.

10. Точечная сварка металлов толщиной 0,8—3,0 мм

Способ конденсаторной сварки сопротивлением за последние годы довольно широко распространен для получения неразъемных соединений из металлов толщиной 0,8—3,0 мм. Важно при этом подчеркнуть, что использование конденсаторных машин при точечной сварке самых различных изделий ответственного назначения (узлов летательных аппаратов, атомных реакторов, специальных железнодорожных вагонов, автомобилей и других изделий) позволило стабилизировать размеры ядра сварных точек, значительно уменьшить ширину ЗТВ и деформацию деталей в зоне соединения.

Технологический процесс сварки мелких деталей толщиной более 0,8 мм практически мало отличается от процесса сварки металлов малых толщин. Однако наиболее часто сварные узлы из металлов толщиной свыше 0,8—1,0 мм представляют собой довольно крупные объемные пространственные конструкции. Часто детали в этих узлах сопрягаются между собой по криволинейным поверхностям и имеют значительные размеры. Поэтому технологический процесс изготовления сварных крупных узлов из металлов толщиной 0,8—3,0 мм в ряде случаев отличается от процесса сварки узлов из металлов малых

толщин и содержит ряд дополнительных операций. К таким операциям относятся предварительная сборка, подгонка (доводка) свариваемых деталей, нанесение на сопрягаемые поверхности деталей [78, 229, 230] жидкого или пастообразного клея (грунта)¹, окончательная сборка, прихватка, введение жидкого клея (грунта) в зазор между деталями (под нахлестку) после сварки и антидеформационная обработка (если последняя требуется).

Предварительная сборка и подгонка свариваемых деталей выполняются в основном при зазорах в нахлесточных соединениях, превышающих допустимую для данной толщины и размеров деталей величину (обычно 0,3—1,5 мм)²; значительной шероховатости поверхности; непараллельности поверхности деталей в зоне сварки и рабочей поверхности электродов; плохом сопряжении деталей в зоне сварки на участках повышенной жесткости деталей; касании одной или обеих деталей боковой поверхности электродов; несовпадении баз фиксации свариваемых деталей в сборочной оснастке и т. д. Эти операции резко снижают производительность труда и исключают возможность эффективного внедрения широкой механизации и автоматизации сборочных, сварочных и транспортных операций при изготовлении узлов.

Сборка мелких деталей из металлов толщиной 0,8—3,0 мм выполняется в малогабаритных приспособлениях, установленных на электрододержателях и электродах. Они аналогичны приспособлениям, которые используются при сварке металлов малых толщин. Применение сборочных технологических отверстий и выступов в деталях, также (как и при микросварке) значительно повышает производительность сборочно-сварочных операций.

Для сборки деталей средних и больших размеров используются приспособления стапельного типа. Здесь фиксация деталей друг относительно друга осуществляется легкоъемными пружинами, на внутренней стороне которых обычно укреплены резиновые прокладки. К этим приспособлениям по сравнению с приспособлениями для микросварки предъявляется ряд дополнительных требований: защита технологических фиксаторов и шпилек от возможных выплесков жидкого металла, минимальные размеры опорных поверхностей, исключение шунтирования сварочного тока (например, изолированием фиксаторов и упоров от токоведущих частей вторичного контура), минимальные снижения сварочного тока при введении приспособления в сварочный контур машины (благодаря уменьшению в приспособлении до минимума массы ферромагнитных материалов) и др.

¹ Эти операции выполняются только при изготовлении клеесварных конструкций. В одних случаях конструкции получают путем сварки по клеям (грунтам), а в других — процесс сварки не отличается от обычного и клей вводят после выполнения сварочной операции. Клеесварные соединения обеспечивают высокие характеристики циклической прочности, работоспособности, антикоррозионной стойкости, а также снижение массы конструкции (так как клеевая прослойка воспринимает значительную часть напряжений при нагружении соединения) [230].

² Допустимая величина таких зазоров возрастает с уменьшением толщины металла и увеличением шага точек [228].

Таблица 25. Ориентировочные режимы сварки стали 12Х18Н9Т и сплава ОТ4 равных толщин

Толщина деталей, мм	Параметры						
	установочные				технологические		
	C_p , мкФ	U_c , В	F_d , кН	$d_{\text{э}}$, мм	$I_{\text{св макс}}$, кА	t_a , мс	$t_{\text{св}}$, мс
Сталь 12Х18Н9Т							
0,3+0,3	19 600	190	2,5	3,0	7,8	10	30
0,5+0,5	19 600	200	3,5	4,0	8,5	10	34
0,8+0,8	29 400	200	5,5	5,0	9,6	12	40
1,0+1,0	39 200	200	8,0	5,0	14,8	15	48
1,5+1,5	127 400	200	16,0	7,0	20,1	29	112
Сплав ОТ4							
0,5+0,5	19 600	190	2	4,0	6,6	10	36
0,8+0,8	19 600	200	2,5	5,0	7,5	10	38
1,0+1,0	29 400	200	3,5	5,0	10,3	13	40
1,5+1,5	78 400	200	5	7,0	18,1	24	90
2,0+2,0	147 000	200	6,5	8,0	19,9	36	128

Примечание. Машина МТК-75, $k_T = 39$.

Значительное повышение технико-экономической эффективности процесса конденсаторной сварки металлов толщиной 0,8—3,0 мм достигается при использовании автоматических устройств для перемещения сварочных приспособлений с деталями в рабочем пространстве машины в соответствии с заданным шагом точек. Как при автоматическом, так и при неавтоматическом перемещении приспособлений следует исключить трение поверхности свариваемых деталей и контактной поверхности электрода, т. е. в процессе перемещения свариваемые детали должны быть подняты над нижним и не касаться верхнего электрода [49, 52, 176, 228].

Широкое использование при конденсаторной сварке различных узлов должны получить в ближайшее время многофункциональные автоматические устройства с программным управлением — самонастраивающиеся роботы [175], которые корректируют свою работу в соответствии с изменением конкретных условий выполнения технологического процесса. Одна из важных функций таких роботов — совершенствование транспортных установочных и съемных операций при выполнении сварочных операций.

Как указывалось выше, состояние поверхности свариваемых деталей оказывает существенное влияние на качество микросварного соединения, однако при сварке деталей 0,8—3,0 мм оно проявляется значительно меньше. Тем не менее, кроме обязательного удаления масла, маркировочной краски и других загрязнений промывкой в органических растворителях (ацетоне, бензине, трихлорэтилене, четыреххлористом углероде и др.), для получения стабильных сварных соединений необходимо подвергнуть детали специальной химической обработке [175, 228].

Таблица 26. Ориентировочные режимы сварки сплавов АМц и Д16 равных толщин

Толщина де- талей, мм	Параметры								
	установочные					технологические			
	C _p , мкФ	U _c , В	Усилие, кН		R ₀ , мм	I _{св} макс, кА	t _a , мс	t _{св} , мс	t _{F_{0K}} , мс
			F ₀	F _{0K}					
Сплав АМц									
0,3+0,3	8400	340	0,8	—	25	15,0	6	21	—
0,5+0,5	16 800	320	1,2	—	50	20,5	12	27	—
0,8+0,8	33 600	320	1,9	—	75	28,0	18	46	—
1,0+1,0	42 000	340	2,5	—	100	32,5	19	50	—
1,5+1,5	67 200	360	4	—	150	44,0	24	64	—
2,0+2,0	100 800	380	5,5	10	150	54,0	26	78	84
2,5+2,5	168 000	400	7	14	200	65,0	32	100	118
Сплав Д16									
0,3+0,3	8400	360	1,2	—	25	16,0	6	21	—
0,5+0,5	16 800	320	2	—	50	20,5	12	27	—
0,8+0,8	25 200	360	3	5	75	27,5	14	39	34
1,0+1,0	33 600	340	4	8	100	30,5	18	46	41
1,5+1,5	84 000	360	6	14	150	48,0	26	68	65
2,0+2,0	109 200	380	8	21	150	55,0	28	74	84
2,5+2,5	176 400	400	10	30	200	67,0	38	104	127

Примечания. 1. Машина МТК-75, $k_T = 39$. 2. В этой и некоторых других таблицах: R_0 — радиус рабочей части сферического электрода; $t_{F_{0K}}$ — время начала приложения усилия F_{0K} , отсчитываемое от момента включения сварочного тока.

При выполнении клеесварных соединений подготовка поверхности деталей производится по специальной программе [230]. При точечной конденсаторной сварке по клею (грунту) из-за повышения его вязкости и, следовательно, неравномерного выдавливания из зоны контакта деталь — деталь может увеличиваться $R_{длх}$, что обуславливает появление в ядре точки пор, трещин и рыхлостей. Поэтому необходимо строго контролировать вязкость клея и время хранения деталей после его нанесения на поверхность.

При точечной сварке металлов толщиной более 0,8 мм прихватка деталей выполняется на конденсаторной машине в сварочных приспособлениях (стапелях) от середины к краю и от участка высокой жесткости к участку пониженной жесткости свариваемого узла; шаг точек — 100—300 мм, параметры режима аналогичны сварочным.

Выше было показано, что параметры режима точечной конденсаторной сварки конкретных материалов зависят от ряда факторов, а поэтому разработка инженерных методов их расчета затруднена. Конденсаторная сварка металлов толщиной более 0,8 мм не является исключением. Поэтому для этого вида сварки так же, как и для сварки металлов малых толщин, разработаны ориентировочные параметры режимов сварки различных материалов (табл. 25—28), полученные на основе анализа и обработки экспериментальных данных [78, 175, 228] и некоторых наших исследований. Здесь так же, как и при

Таблица 27. Ориентировочные режимы сварки стали 12Х18Н9Т и сплава ОТ4 неравных толщин

Толщина деталей, мм	Параметры							
	Установочные					Технологические		
	C_p , мкФ	U_c , В	F_{Σ} , кН	Электроды со стороны детали, мм		$I_{св\ max}$, кА	t_a , мс	$t_{св}$, мс
				R_3	d_3			
Сталь 12Х18Н9Т								
0,3+4,0	19 600	230	2,5	25	12	8,3	10	34
0,5+2,0	19 600	230	3,0	50	8	8,7	10	36
0,5+4,0	19 600	260	3,0	50	12	9,2	10	38
0,5+0,5+2,0	19 600	240	3,0	50	50	9,3	10	36
0,8+4,0	29 400	230	5,0	75	12	9,8	12	42
Сплав ОТ4								
0,3+2,0	19 600	210	1,5	25	8	6,4	10	38
0,6+2,0	19 600	230	2,0	50	8	7,1	11	38
0,6+4,0	19 600	250	2,0	50	10	7,5	12	40
0,8+4,0	29 400	220	2,5	75	10	8,7	12	42

Примечание. Машина МТК-75, $k_T = 39$.

микросварке алюминиевых и медных сплавов, отличающихся высокой электро-, теплопроводностью, требуются большие значения тока $I_{св}$, но меньшие — времени t_a и $t_{св}$, чем для коррозионно-стойких сталей, жаропрочных и титановых сплавов. Алюминиевые сплавы повышенной пластичности по сравнению с упрочненными сплавами алюминия свариваются при меньших усилиях сжатия F_{Σ} . Значительные усилия необходимы при сварке коррозионно-стойких сталей и жаропрочных сплавов [228].

Для предотвращения горячих трещин, рыхлостей и пор в литой зоне соединения алюминиевых сплавов следует применять дополнительное сжатие деталей — ковочное усилие $F_{жк}$. Проковка при сварке металлов $\delta > 1$ мм уменьшает также общую деформацию деталей, снижает остаточные напряжения и повышает усталостную прочность точек [175, 228], поэтому ее целесообразно использовать не только для металлов, склонных к образованию трещин, рыхлостей и пор, но и вообще для повышения качества соединений.

При конденсаторной сварке закаливающихся сталей $\delta > 1$ мм, так же как и при микросварке, термическую обработку сварных точек следует проводить непосредственно между электродами за счет дополнительного импульса тока, длительность которого должна быть в 1,5—2 раза больше сварочного импульса. Однако современные серийные конденсаторные машины для сварки металлов толщиной более 1 мм пока не обеспечивают таких циклов.

При точечной конденсаторной сварке никеля из-за его малого удельного сопротивления (примерно на порядок меньше, чем у стали 12Х18Н9Т), что при прочих равных условиях требует больших $I_{св}$, наблюдаются прилипание электродов к деталям и выплески. Эти труд-

Таблица 28. Ориентировочные режимы сварки алюминиевых сплавов неравных толщин и разнородных

Марка материала	Толщина деталей, мм	Параметры								
		установочные					технологические			
		Cp, мкФ	Uс, В	Fэ, кГц	Fэж, кГц	Rэ электрода со стороны тонкой детали, мм	Iсв макс, кА	tа, мс	tсв, мс	tРэж, мс
Д16	0,5+2,0	16 800	370	2	—	25	25,5	12	27	—
	1,0+4,0	42 000	340	4	8	75	32,5	19	50	52
	1,5+4,0	92 400	360	6	14	100	50,0	26	80	82
АМцАМ	0,8+3,0	51 400	320	1,9	—	50	33,0	20	56	—
	1,0+3,0	67 200	340	2,5	—	50	40,0	24	64	—
	1,5+3,0	8400	360	4	—	75	48,0	26	66	—
АМг6	1,0+2,0	51 400	300	5	7,5	75	31,0	20	56	58
	1,0+4,0	51 400	340	5	8	75	36,0	20	56	58
	В95 + Д16	2,0+2,0	109 200	370	8	21,0	100	53,5	28	74
В95 + АМг6	2,0+2,0	109 200	370	9	21,0	100	53,5	28	74	84
Д16 + АМг6	2,0+2,0	109 200	370	9	21,0	100	53,5	28	74	84
Д16 + АМц	1,0+3,0	51 400	350	4	—	75	38,0	20	56	—
То же	1,5+3,0	84 000	380	6	10	100	51,0	26	70	72
» »	1,0+2,0	51 400	340	4	—	75	36,0	20	56	—

Примечания 1. Машина МТК-75, $\eta_T = 39$. 2. Со стороны толстой детали электрод с R_э = 100 мм.

ности можно существенно уменьшить, если нанести на наружные поверхности деталей слой графита [228]. Из химически активных и тугоплавких металлов и их сплавов (кроме титана) этим способом хорошо сваривается цирконий, причем ток $I_{св}$ по сравнению со сваркой титана необходимо увеличивать на 60—70 % [228], не изменяя других параметров режима. Сварка коррозионно-стойких сталей с жаропрочными сплавами должна выполняться на режимах, близких к режимам сварки указанных сталей.

Точечная конденсаторная сварка алюминиевых сплавов по клеям и грунтам отличается от обычной сварки этих материалов большей длительностью t_a и повышенным усилием сжатия [198, 230].

Важным вопросом при точечной конденсаторной сварке металлов толщиной более 0,8 мм является подбор оптимальной формы рабочей части электродов. Сварку большинства металлов и сплавов (за исключением алюминия и магниевых сплавов) равных толщин следует выполнять коническими и цилиндрическими электродами с плоской контактной поверхностью. При сварке алюминиевых и магниевых сплавов, а также металлов неравных толщин целесообразно использовать электроды со сферической рабочей частью (последний устанавливается со стороны тонких деталей).

При разработке режимов точечной конденсаторной сварки металлов неравных толщин и разнородных, следует пользоваться рекомендациями, приведенными в параграфе 9 данной главы.

Для получения качественных точечных сварных соединений необходимо, чтобы размер нахлестки и шаг точек выбирались в зависимости

Таблица 29. Конструктивные элементы сварных узлов и соединений, выполняемых точечной сваркой на конденсаторных машинах средней и большой мощности

Толщина детали, мм	Минимальная нахлестка d (при одностороннем шве), мм		Минимальный шаг точек L_T , мм			Средний диаметр литого ядра точки, мм
	Жаропрочные стали и титановые сплавы	Алюминиевые, магниевые и медные сплавы	Низкоуглеродистые и низколегированные стали	Коррозионностойкие, жаропрочные и титановые сплавы	Алюминиевые, магниевые и медные сплавы	
0,3 *	6	8	8	7	8	3,0
0,5 *	8	10	10	9	11	3,5
0,8	10	12	13	11	13	4,0
1,0	12	14	14	12	15	4,5
1,2	13	16	15	13	16	5,5
1,5	14	18	17	15	20	6,5
2,0	16	20	21	18	25	7,5
2,5	18	22	23	20	30	8,5
3,0	20	26	28	24	35	10,0

* Металлы и сплавы таких толщин наиболее часто свариваются точками на маломощных конденсаторных машинах.

ти от толщины и марки металла в соответствии с данными, приведенными в табл. 29 [175, 228].

Уменьшение размера нахлестки вызывает выплески металла и снижает прочность соединения в результате раздавливания кромки детали, а уменьшение шага точек без увеличения тока $I_{св}$ вызывает непровары из-за увеличения тока шунтирования. При точечной сварке небольших деталей из металлов толщиной более 0,8 мм размер нахлестки, шаг точек и размер литой зоны сварной точки могут быть снижены [228] в соответствии с конкретными условиями эксплуатации узла. Однако при выполнении крупных сварных конструкций этого, как правило, делать нельзя.

Важно также отметить, что при точечной конденсаторной сварке металлов толщиной 0,8—3,0 мм так же, как и в случае микросварки, подогрев деталей и сглаживание переднего фронта импульса сварочного тока позволят существенно улучшить качество формирования сварных соединений, практически исключить брак по выплескам, следам электродного материала на поверхности деталей и другим дефектам.

В заключение следует отметить несомненную перспективность еще более широкого внедрения в промышленность точечной конденсаторной сварки металлов толщиной 0,8—3,0 мм и даже более [239]. При этом немаловажными являются весьма существенные энергетические преимущества этого способа сварки. В частности, по данным работы [78], конденсаторная машина МТК-75 для точечной сварки алюминиевых сплавов толщиной до 2,5 + 2,5 мм имеет мощность зарядного устройства, равную 75 кВ · А, а эквивалентные ей машины постоянного и однофазного тока 50 Гц должны иметь мощность, соответ-

ственно равную 300—400 и 1500 кВ · А. Если учесть, что точечные (и другие) конденсаторные машины загружают питающую их сеть промышленного тока только во время довольно больших пауз между сварками двух точек, а машины постоянного тока и однофазные связаны с этой сетью непосредственно в процессе сварки, то совершенно ясно, что первые создают нагрузку сети не только малую по мощности, но и растянутую во времени, а вторые — большую (пиковую) и кратковременную, что, безусловно, значительно хуже.

11. Рельефная сварка

В последние годы развитие конденсаторной сварки сопротивлением характеризуется все более широким ее применением для получения рельефных микросварных соединений [36, 42].

Известно, что принципиальной особенностью в целом рельефной контактной [54], в том числе и конденсаторной, сварки является возможность одновременного выполнения нескольких сварных точек и даже получения шовного сварного соединения по замкнутому контуру. Это значительно снижает вспомогательное t_v и основное технологическое t_t время, необходимое для выполнения сварочной операции, а также время $t_{об}$ на техническое обслуживание сварочного оборудования, упрощает конструкцию сварочных приспособлений и облегчает механизацию вспомогательных операций (по сравнению с точечной сваркой).

Для рельефной конденсаторной сварки вполне можно использовать серийные универсальные машины (например, при микросварке — машины ТКМ-7, ТКМ-14, ССП-3, ТКМ-15, ССП-5 и ТКМ-17, а для рельефной сварки металлов толщиной 0,8 мм и более — машины МТК-75, МТК-5001, МТК-8002 и др.).

К технологическим преимуществам рельефной сварки [49, 54, 137, 142, 175] следует отнести повышенное благодаря рельефу тепловыделение в контакте деталь — деталь, что обеспечивает получение качественных соединений при сварке металлов, значительно отличающихся по теплофизическим свойствам и толщине; высокую стойкость рабочих частей электродов, поскольку плотность сварочного тока в контактах электроды — детали обычно невелика; меньшую, чем при точечной сварке, зависимость качества сварных соединений от размеров и состояния поверхности электродов; возможность постановки сварных точек с меньшим шагом по сравнению со сваркой на многоэлектродных машинах, где минимальный шаг точек в значительной мере зависит от габаритных размеров электрододержателей, узлов перемещения штоков с подвижными электродами и др.; хороший внешний вид соединений, отсутствие на поверхности деталей следов и вмятин от электродов; возможность получения в отличие от точечной сварки качественных сварных соединений непосредственно вблизи края листовых деталей; высокая работоспособность и стабильность прочностных характеристик сварных соединений (с литым ядром и в твердом состоянии) при статических и динамических нагрузках.

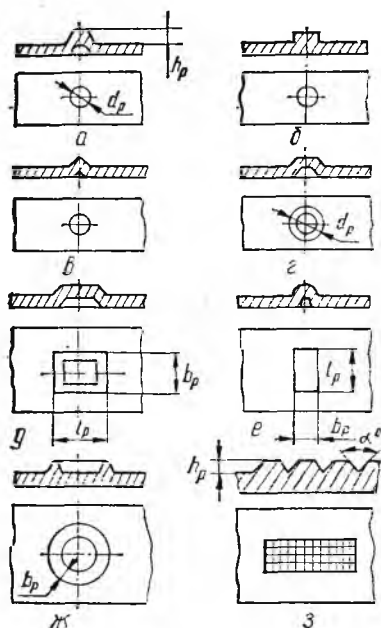


Рис. 70. Типы рельефов.

сферический (рис. 70, а) удлинённый овальный (рис. 70, е) и контурный овальный (в том числе круглый — рис. 70, ж), с мелкой насечкой — удлинённый (рис. 70, з), контурный и точечный.

Для выбора диаметра d_p и высоты h_p точечного рельефа при конденсаторной микросварке листовых деталей толщиной 0,1—0,7 мм надо пользоваться следующими эмпирическими формулами, учитывая при этом, что обычным является примерное равенство диаметра рельефа d_p и ядра точки d_n :

$$d_p = (3 \div 5) \delta^1; \quad (V.5)$$

$$d_p = (1,2 \div 2,0) \delta; \quad (V.6)$$

$$h_p = (0,4 \div 0,9) \delta. \quad (V.7)$$

При использовании других типов точечных рельефов (см. рис. 70, д) их ширина b_p и длина l_p выбираются практически равными d_p . Размеры контурных и продолговатых рельефов необходимо выбирать в каждом конкретном случае исходя из конструктивных особенностей свариваемых деталей. В случае применения рельефов с мелкой насечкой высота последней для микросварных соединений должна составлять не более 20—40 мкм, а угол α (см. рис. 70, з) — 60 или 90°.

¹ Этой формулой следует пользоваться в тех случаях, когда требуется возможно большая прочность рельефного точечного микросварного соединения, а формулой (V.6), — если к прочности такого соединения предъявляются значительно менее жесткие требования (что характерно для микросварки).

Размеры точечных рельефов, предлагаемых различными авторами [54, 67] для сварки металлов толщиной 0,3—3,0 мм на конденсаторных машинах средней и большой мощности, имеют существенные расхождения. Поэтому, учитывая данные обеих работ, можно в зависимости от толщины металла δ и требуемого диаметра ядра точки d_n выбирать диаметр d_p и высоту h_p точечного рельефа по формулам

$$d_p = (0,5 \div 0,8) d_n \text{ или } d_p = 2\delta + 0,75 \text{ мм,} \quad (\text{V.8})$$

$$h_p = (0,2 \div 0,3) d_p \text{ или } h_p = 0,4\delta + 0,25 \text{ мм.} \quad (\text{V.9})$$

При рельефной точечной конденсаторной сварке металлов важен вопрос о допусках на размеры рельефов. Так, в случае микросварки допуски на диаметр d_p и высоту h_p рельефа не должны превышать 0,02—0,05 мм; при сварке металлов толщиной 0,5—0,8 мм — $\pm 0,1$ мм (на диаметр) и $\pm 0,05$ мм (на высоту) и толщиной более 0,8 мм — соответственно $\pm 0,15$ и $\pm 0,12$ мм [54, 67].

При рельефно-контурной сварке поперечные размеры рельефов следует рассчитывать по формулам [54]

$$b_p \approx 1,2\delta; \quad h_p \approx 0,6\delta, \quad (\text{V.10})$$

где b_p — ширина основания контурного рельефа.

Деталь, на которой выполняется рельеф, следует выбирать исходя из условий обеспечения оптимального формирования сварного соединения следующим образом: 1) при сварке металлов равных толщин и однородных — на любой детали; 2) в случае сварки однородных металлов неравных толщин — на толстой детали при соотношении толщин не более 1 : 3 и на тонкой, когда оно больше 1 : 3; 3) при сварке деталей равных толщин из разнородных металлов — на детали с большей теплопроводностью; 4) в случае сварки разнородных металлов неравных толщин — в соответствии с указанными выше рекомендациями по пп. 2,3.

При рельефной сварке наличие заусенцев и неровностей на кромках, а также выпуклостей на поверхностях деталей недопустимо, так как эти дефекты обуславливают ухудшение качества соединений.

Высадка (формирование) рельефов должна осуществляться в большинстве случаев холодной штамповкой с помощью матриц и пуансонов, изготавливаемых из сталей типа X12M, 7X3, 6XBT и др. Высадку рельефов следует по возможности совмещать со штамповкой деталей, что резко снижает трудоемкость их изготовления. При выборе основных размеров пуансонов и матриц для высадки рельефов следует пользоваться данными работ [54, 67].

Основные рекомендации для выбора режимов рельефной сварки приведены в параграфе 5 данной главы. Вместе с тем при разработке таких режимов необходимо учитывать следующее:

1) для получения сварных соединений без выплесков следует (из-за повышенных значений $R_{з.сх}$ и $R_{длх}$) использовать несколько большие по сравнению с точечной конденсаторной сваркой значения t_a ;

2) при групповой рельефной сварке усилие F_a и ток $I_{св}$ необходимо увеличивать пропорционально числу рельефов, а время t_a и $t_{св}$ в основном не изменять [54, 67];

3) усилие F_a следует прикладывать плавно, так как в противном случае рельефы сминаются еще до включения сварочного тока, что значительно дестабилизирует процесс сварки;

4) при групповой рельефной сварке для обеспечения равномерного распределения сварочного тока и усилия F_a между отдельными рельефами, необходимо, чтобы обеспечивалась стабильность их размеров. В противном случае характерными дефектами при сварке рельефов с большим диаметром или меньшей высотой будут являться непровары, а у рельефов с меньшим диаметром — перегрев зоны соединения [54, 67, 120];

5) режим рельефной сварки однородных металлов неравных толщин так же, как при их точечной сварке, должен выбираться, в основном, по тонкой детали;

6) в случае сварки разнородных металлов равных толщин режим сварки необходимо разрабатывать на основе металла с более высокой теплопроводностью, а если свариваются разнородные металлы неравных толщин — в соответствии с рекомендациями п. 5;

7) в случае одновременной сварки деталей с несколькими рельефами необходимо располагать эти детали между электродами таким образом, чтобы длина пути тока через каждый рельеф отличалась незначительно [54, 67, 120].

В настоящее время рельефная конденсаторная микросварка широко используется [13] для получения неразъемных соединений контактов из различных благородных металлов и сплавов с контактодержателями, узлов микроминиатюрных и миниатюрных приборов коммутационной техники (микрореле), узлов электровакуумных приборов, миниатюрных крепежных деталей и др. [42].

Важной особенностью конденсаторной микросварки миниатюрных деталей с одним рельефом является шунтирование тока из-за касания нижней кромки торца одной детали, на которой выполнен этот рельеф, с поверхностью другой детали. Это явление связано с малыми размерами деталей и высотой рельефа, а также с наблюдаемой на практике незначительной непараллельностью рабочих поверхностей электродов. Для исключения шунтирования тока и снижения из-за этого прочностных характеристик таких соединений необходимо применять групповую рельефную сварку (с тремя точечными или двумя продолговатыми рельефами). В частности, хорошие результаты получены при микросварке миниатюрных контактов (из сплавов SrMgH , SrMgHCr , SrMgC и др.) с двумя продолговатыми рельефами (высотой 0,1 мм, шириной у основания 0,24 мм и длиной 1,15 мм) с держателями из бронзы (БрБ2, БрБ2,5, БрБНТ1,7, БрБНТ1,9) толщиной 0,15—0,30 мм. При этом более высокие прочностные характеристики получены при использовании электродов со стороны контакта из псевдосплава $\text{W} - \text{Cu}$ [42, 150].

При рельефной конденсаторной микросварке широкое применение в последнее время получили рельефы [42] с насечкой (см. рис. 65, и),

использование которых особенно целесообразно при микросварке разнородных металлов толщиной 0,05—0,3 мм, а также в тех случаях, когда необходимо получить соединения со значительно большей площадью соединения, чем при точечной микросварке, или с практически весьма незначительными деформациями и следами от материала электродов на поверхности деталей.

Получает также распространение Т-образная конденсаторная микросварка [42], в частности, при изготовлении различных узлов (особенно в производстве коммутационных приборов) деталей из листовых металлов (см. рис. 65, к). При этом не менее двух-трех рельефов выполняется на торце одной из деталей, а сварочный ток подводится к ее боковой поверхности (вблизи места сварки).

При рельефной микросварке крепежных деталей в виде болтов, гаек и шпилек с листовыми металлами используются рельефы в основном кольцевой формы (см. рис. 65, о и л), выполняются они на крепежных деталях, а сварочный ток подводится к их торцам или к боковым поверхностям [137, 142].

Рельефной конденсаторной сваркой выполняются также неразъемные соединения контактов на основе золота, серебра и платины диаметром 1,0—10 мм с держателями из латуни, бронзы и нейзильбера, а также сепараторы шарикоподшипников и др. [239, 240].

В последнее время в СССР и за рубежом разработаны и выпускаются металлопласты — стали с пластмассовым покрытием (обычно с одной стороны листа) защитно-декоративного назначения [54, 239, 240]. Для выполнения неразъемных соединений из этих сталей используется [239, 240] рельефная конденсаторная сварка с односторонним токоподводом, причем плакированная поверхность лицевой детали прижимается к металлической плите с внутренним водяным охлаждением. Малое время ($t_{св} = 0,003 \div 0,01$ с) и охлаждение плакированной поверхности листа позволяют сохранить хороший внешний вид покрытия. При сварке металлопластов толщиной 0,6—1,6 мм (толщина пластмассового покрытия 0,2—0,3 мм) усилие F_a не превышает 600—2000 Н [239].

Широко и эффективно используется в промышленности для герметизации корпусов полупроводниковых приборов в контролируемой среде (осушенном воздухе, азоте и гелии) конденсаторная сварка [101, 102, 104, 106, 196, 239] по контурным рельефам (кольцевым и прямоугольным). Например, в таких приборах свариваются покрытые никелем детали из кобальта толщиной 0,2 мм с применением рельефов шириной 0,3 мм и высотой 0,15 мм. Здесь ток $I_{св}$ выбирается исходя из условия $I_{св} = 0,7 \div 1,0$ кА на один миллиметр длины периметра рельефа, а усилие, отнесенное к площади контурного шва — 150—200 МПа [54, 102]. С целью уменьшения габаритов полупроводниковых приборов их герметизацию в ряде случаев выполняют сваркой по кромке отбортовки на деталях [54, 239].

Следует также отметить, что для получения качественных соединений при рельефной конденсаторной сварке, кроме выполнения указанных выше рекомендаций технологического характера, необходимо уделять внимание разработке и использованию эффективных

сварочных приспособлений, обеспечивающих подачу, фиксацию, закрепление в требуемом положении и съем деталей. При этом наряду с учетом указанных выше требований к конструированию приспособлений для точечной конденсаторной сварки особое внимание следует уделить предотвращению возможности шунтирования сварочного тока, что достигается прежде всего изоляцией от электродов шпилек, втулок и колец, фиксирующих обе свариваемые детали. Если положение одной из свариваемых деталей фиксируется ее непосредственной (или через вспомогательный узел) посадкой на один из электродов, то должна быть также предусмотрена изоляция свариваемой детали от этого электрода.

Широкое использование различных технологических процессов точечной и рельефной конденсаторной сварки вносит и будет давать существенный вклад в развитие различных отраслей приборостроения, радиоэлектроники, машиностроения и других важных отраслей промышленности.

ЭЛЕКТРОДЫ И МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ

1. Электроды для точечной и рельефной сварки

Из теории контактной сварки [179] известна и при выполнении точечных соединений из металлических листов наиболее часто соблюдается зависимость $d_s \equiv \delta$. От диаметра контактной поверхности электрода d_s зависит [52] диаметр ядра сварной точки $d_n = k_s d_s$. Поэтому выбору оптимальных диаметров d_s и формы рабочих частей электродов должно быть уделено серьезное внимание.

Электроды для точечной сварки следует классифицировать по трем признакам (рис. 71): конфигурации контактной поверхности, форме рабочей части и конструктивному исполнению.

В настоящее время для точечной сварки листовых металлов применяются электроды (рис. 72) с плоской и сферической [52, 59, 137, 175, 216, 228] контактной поверхностью. Однако в ряде случаев требуются электроды, контактная поверхность которых может иметь различную конфигурацию, обычно довольно строго соответствующую конфигурации той части свариваемой детали, к которой должны примыкать (контактировать) такие электроды. При точечной сварке крестообразных соединений из круглых проволок на электродах должна быть контактная цилиндрическая поверхность, вогнутая внутрь.

Для осуществления при сжатии двух листов плотного прилегания к ним обоих электродов контактные поверхности последних должны быть плоскими (рис. 72, а). При этом необходимо, чтобы данной толщине свариваемого металла δ соответствовала и вполне определенная (заданная по режиму сварки) площадь контактирования электродов с металлическими листами, что при плоской и круглой контактной поверхности электродов может гарантироваться постоянством диаметра d_s . Последнее необходимо для обеспечения требуемого по технологии диаметра ядра точки d_n , так как от него зависят прочностные характеристики точечных сварных соединений [49, 52, 175, 228].

Указанным выше требованиям теоретически и в значительной мере технологически не отвечают электроды со сферической контактной поверхностью (рис. 72, б), которые [49, 52] главным образом применяются для сварки алюминиевых и магниевых сплавов [52, 175, 216, 228]. Основным недостатком электродов со сферическим профилем контактной поверхности является то, что при точечной сварке

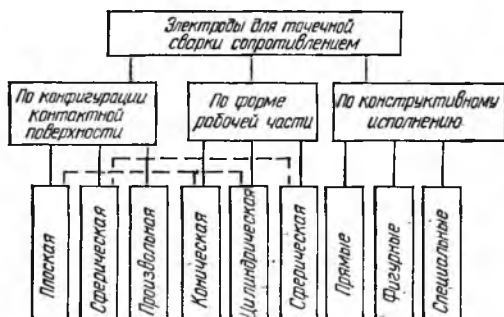


Рис. 71. Классификационная схема электродов для точечной сварки.

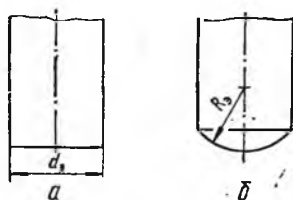


Рис. 72. Плоский (а) и сферический (б) профили контактной поверхности электродов для точечной контактной сварки металлических листов.

металлических листов плотное прилегание к ним таких электродов оказывается невозможным, поскольку контакт сферы с плоскостью теоретически может осуществляться только в точке, а поэтому здесь совершенно невозможно применять формулы $d_n \equiv \delta$ [179] и $d_n = k_\delta d_\phi$ [49, 52], так как при точечном контакте электрод — деталь понятие о диаметре d_ϕ оказывается теоретически бессмысленным¹. Также явно не определен при этом и вопрос о плотности сварочного тока² (теоретически в точечном контакте $j_{св} = \infty$).

Вторым важным признаком, по которому разделяются электроды, является форма их рабочей части, причем таких основных форм три (рис. 73): коническая, цилиндрическая и сферическая. При этом в электродах с конической и цилиндрической формами рабочих частей контактные поверхности последних являются плоскими, а в электродах со сферической рабочей частью их контактная поверхность является сферической.

Вопрос о рациональности той или иной формы рабочей части электродов для точечной сварки должен в первую очередь решаться из условия постоянства в процессе работы таких электродов площади их контактной поверхности d_n и плотности сварочного тока $j_{св}$, задаваемых в параметрах режима сварки [49, 52, 137, 142].

Совершенно очевидно, и это следует из формулы $d_n = k_\delta d_\phi$, что при сварке металла данной марки и толщины δ (здесь $k_\delta = \text{const}$) требуемый из условий конструкции сварного соединения и технологии сварки диаметр ядра точки d_n может быть, при прочих равных условиях, получен только при вполне определенном диаметре d_ϕ .

Если же говорить о необходимости обеспечения стабильности диаметра d_n (особенно для ответственных точечных сварных соединений), то непременным условием должно являться $d_\phi = \text{const}$ ³. Такому тре-

¹ Вопрос о технологических возможностях применения таких электродов рассматривается ниже.

² Плотность этого тока в контакте электрод — деталь является отношением тока $I_{св}$ к площади такого контакта.

³ Ниже приводится анализ этой формулы при допущении того, что при сварке диаметр d_ϕ ввиду расклепывания рабочей части электродов не увеличивается, что не совсем точно, но упрощает рассмотрение трактуемого вопроса.

бованию в первую очередь отвечает электрод для точечной сварки, имеющий цилиндрическую форму рабочей части, поскольку при выработывании последней заданный размер d_0 легко восстанавливается благодаря такой несложной операции, как запиловка и полировка непосредственно в сварочной машине контактных поверхностей этой рабочей части. Поскольку она является цилиндрической, то при многократных запиловках диаметр d_0 всегда остается практически постоянным. В связи с этим важным преимуществом электрода с цилиндрической формой рабочей части необходимо отметить следующее:

1. Электрод такой формы был впервые разработан и широко внедрен В. Э. Моравским около 30 лет назад [136] применительно к точечной конденсаторной микросварке на серийных машинах типа ТКМ [144—147], а затем и на ряде других машин подобного типа [105, 145, 147, 157], причем в настоящее время электроды с такой формой рабочей части являются основными во всей области применения точечной контактной микросварки в радиоэлектронике и приборостроении.

2. За последние годы электроды с цилиндрической формой рабочей части успешно применяются на многих заводах при точечной сварке металлов толщиной 0,8—1,5 мм, чему в значительной мере способствует указанная в табл. 14 современная тенденция в области контактной сварки сопротивлением к существенному уменьшению оптимальных значений $t_{св}$. Это значит, что при малых $t_{св}$ рабочие части электродов всех форм нагреваются меньше и такой единственный недостаток цилиндрических электродов¹, как их меньшая (чем у других форм) механическая стойкость под действием усилия сжатия F_0 , проявляется в меньшей мере. Кстати, данный недостаток практически может быть в значительной мере устранен уменьшением длины рабочей части l_0 , применением для изготовления цилиндрических электродов (или только их рабочих частей) более высокопрочных электродных сплавов, увеличением интенсивности охлаждения таких электродов и использованием, если это возможно, меньших усилий сжатия.

Второй и наиболее распространенной при точечной сварке сопротивлением формой рабочей части электродов является плоская коническая, которая нашла самое широкое применение при сварке малоуглеродистых и других сталей толщиной 0,5—3 мм, выполняемой в основном на оборудовании однофазного тока 50 Гц (мощностью около

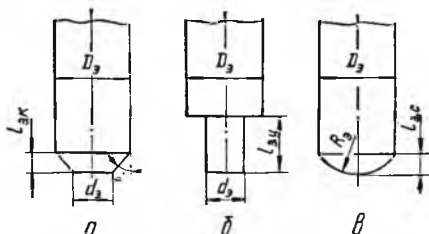


Рис. 73. Основные формы рабочих частей электродов для точечной контактной сварки сопротивлением металлических листов:

а — коническая; б — цилиндрическая; в — сферическая.

¹ Здесь и далее в целях упрощения терминологии электроды с цилиндрической формой рабочей части называются цилиндрическими, с конической формой — коническими и сферической — сферическими.

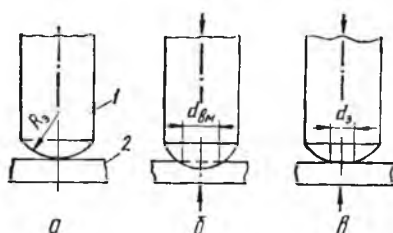


Рис. 74. Схемы контактирования сферического электрода с листовою деталью (а), вдавливания такого электрода в деталь (б) и смятия его сферической рабочей части (в).

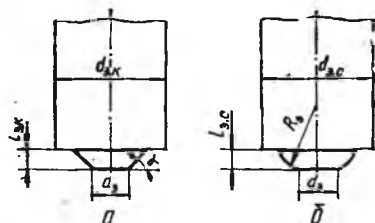


Рис. 75. Электроды для точечной сварки с конической (а) и сферической (б) рабочими частями при значительных размерах диаметров средней части этих электродов.

20—150 кВ · А). Путем выбора (при заданном по технологии диаметре d_3) таких величин, как угол α (см. рис. 73, а), характеризующий конусность электрода, и длина рабочей части $l_{\text{рк}}$, можно получить требуемую по условиям эксплуатации механическую прочность.

Поскольку в коническом электроде имеется плоская контактная поверхность диаметром d_3 , то, применяя такой электрод, можно обеспечивать выполнение условий $d_3 \equiv \delta$ и $d_n = k_\delta d_3$.

Однако конический электрод по сравнению с цилиндрическим имеет недостаток, заключающийся в том, что в процессе его эксплуатации довольно трудно, не обработав пришедшую в негодность его рабочую часть на токарном станке или не применив специальные заправники [175, 228], восстановить заданный по режиму сварки размер диаметра d_3 .

Выше было показано, что теоретически при сферической конфигурации контактной поверхности электрода l ее контакт с металлическим листом 2 получается точечным (рис. 74, а), что крайне нежелательно ввиду очень большой при этом плотности сварочного тока $j_{\text{св}}$. Однако в реальных условиях при точечной сварке металлических листов чисто сферическая рабочая часть электрода с такой контактной поверхностью чаще всего сохраняться не может, так как процесс сварки выполняется с приложением определенных и нередко довольно больших усилий сжатия. Поэтому возможны два наиболее характерных случая деформации контактирующих пар сферический электрод — деталь в их исходном (холодном) состоянии (перед включением сварочного тока): при условии, когда свариваемый металл имеет твердость меньшую, чем рабочая часть такого электрода, последний вдавливается в металлический лист и при этом в нем образуется вмятина диаметром $d_{\text{вм}}$ (рис. 74, б); если свариваемый металл тверже, чем материал рабочей части электрода (это на практике наиболее распространенный случай), то происходит ее смятие с образованием на электроде плоской контактной площадки диаметром d_3 (рис. 74, в).

Если анализировать процесс взаимодействия рабочей части сферического электрода с поверхностными слоями металлических листов после включения сварочного тока и в течение некоторого времени

после его отключения (когда металл в зоне сварки еще не остыл и довольно пластичен), то крайне трудно определить, в каких случаях и как будет такой электрод сминаться или вдавливаться в металлический лист, поскольку в данный момент сварки это зависит от многих факторов (температурного состояния материала рабочей части электрода и листа, размера площади взаимного контактирования в нагретом состоянии этой пары металлов, усилия сжатия F_s при данном режиме сварки, а значит, и давления от этого усилия в зоне сварки и др.). В реальных условиях выполнения точечной сварки эти факторы действуют как бы самопроизвольно и практически управлять ими невозможно, а поэтому получается, что сферические электроды, видимо, не следовало бы применять.

Однако такие электроды все же используются [175, 228] и объясняется это в первую очередь тем, что, поскольку чаще всего твердость поверхностных слоев свариваемого металла (как в холодном, так и в нагретом состоянии) больше твердости примыкающих к ним рабочих частей электродов (также соответственно холодных и нагретых), рабочая часть сферических электродов сминается с образованием на ней плоской площадки диаметром d_s . Поэтому при эксплуатации сферического электрода его точечный контакт с металлическим листом является чисто теоретическим, а фактически этот электрод имеет так же, как конический и цилиндрический электроды, контактную площадку диаметром d_s . Однако размер последней в рассматриваемом электроде является величиной довольно неопределенной ($d_s = \text{var}$) и при его эксплуатации изменяется от значения $d_{s\min}$ (в начале смятия сферической части) до такого критического диаметра $d_{s\max}$ (после сварки определенного числа точек), при котором значительно снижаются прочностные характеристики соединения. При заправке такого электрода должен восстанавливаться не заданный радиус сферы R_s , а необходимый из условий стабильности точечной сварки [8, 130, 132] металла данной марки и толщины оптимальный диаметр d_s , величина которого должна быть постоянной в процессе сварки (с учетом, конечно, износа в допустимых по технологии сварки пределах).

Таким образом, сферический электрод принципиально отличается от конического тем, что в последнем величина d_s задается по режиму сварки и поддерживается на требуемом уровне благодаря заправке конической рабочей части, а при использовании сферического электрода задаваемой величиной является радиус R_s , но при выполнении сварочных операций на его рабочей части образуется круглая контактная площадка, имеющая довольно неопределенную величину. Поэтому конический электрод (не говоря уже о цилиндрическом) является в принципе более предпочтительным, чем сферический. Однако использование последнего возможно, но для этого необходимо, чтобы требуемый (по режиму сварки и по формуле $d_s = k_s d_s$) диаметр площадки d_s на его рабочей части являлся основной характеристикой такого электрода и его величина задавалась (как и R_s) в качестве параметра режима сварки и в процессе эксплуатации сохранялась практически постоянной.

В условиях сварки на точечных машинах с радиальным ходом верхнего электрода (это главным образом устаревшие машины) следует применять электроды со сферической рабочей частью, поскольку они менее чувствительны, чем конические и цилиндрические, к так называемым [49] перекосам электродов. Кроме того, сферические электроды рациональны для точечной сварки металлов неравных толщин (со стороны тонкой детали), что, по данным работы [228], обеспечивает менее глубокие вмятины, чем при использовании электродов с плоской контактной поверхностью. Главным здесь является то, что при сварке металлов неравных толщин сферическим электродом может быть обеспечена требуемая высокая плотность сварочного тока (ввиду небольшой площади контакта электрод — тонкая деталь).

Наконец, как это хорошо видно из сравнения рис. 75, а и б, сферический электрод с образовавшейся на нем контактной площадкой диаметром d_a отличается от конического электрода с таким же d_a только формой боковой поверхности рабочей части. Кстати, при одинаковых размерах d_a , $l_{a,к}$ и $l_{a,с}$ таких форм рабочих частей электродов и прочих равных условиях можно вполне обоснованно утверждать, что механическая стойкость их рабочих частей также должна быть одинаковой. Кроме того, из рис. 75 видно, что когда $l_{a,к}$ и $l_{a,с}$ рабочих частей обоих электродов одинаковы, то требуемый по технологии диаметр d_a может быть получен и при равенстве диаметров средних частей $d_{a,к}$ и $d_{a,с}$, а значит, и масс основной части конического и сферического электродов.

Поэтому отмечаемое в работе [228] такое достоинство сферического электрода, как лучший отвод тепла, вряд ли соответствует действительности¹, так как при $d_{a,к} > d_{a,с}$ можно с уверенностью утверждать, что более высокими теплоотводящими свойствами обладает конический электрод. Таким образом, фактически этот вопрос связан в первую очередь не с формой рабочей части электрода, а с массой последнего [52], величина которой чаще всего с учетом конкретных практических условий подбирается опытным путем (например, может быть небольшой при сферическом электроде или же значительной у конического электрода).

Изложенные выше соображения позволяют сделать следующие важные выводы о рациональных областях применения при точечной конденсаторной сварке металлических листов различных форм рабочих частей электродов:

1) при точечной сварке большинства черных и цветных металлов (кроме алюминиевых сплавов) толщиной 0,8—2,5 мм, как правило, наиболее рациональным является конический электрод;

2) для выполнения точечных соединений из металлов малых толщин (0,02—0,7 мм) и довольно часто толщиной 0,8—1,5 мм наиболее рационален цилиндрический электрод, который удобен в эксплуатации и обеспечивает строгое постоянство диаметра d_a ;

3) при точечной сварке алюминиевых и магниевых сплавов толщи-

¹ Возможно, это утверждение исходит из того, что при большей величине R_a масса сферического электрода получается довольно значительной,

ной 0,5—2,5 мм следует применять сферический электрод. Однако для повышения стабильности размеров ядра точек следует изготавливать его с контактной площадкой требуемого по режиму сварки диаметра $d_{\text{к}}$, поддерживая его постоянно (с допустимым по технологии отклонением) и в процессе эксплуатации. При точечной сварке металлов неравных толщин также целесообразно использовать сферический электрод, устанавливая его со стороны тонкой детали.

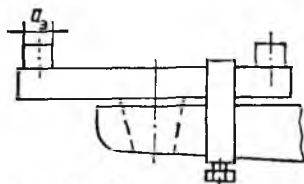


Рис. 76. Крепление фигурного электрода к электрододержателю.

Как указывалось выше, приведенные три формы рабочих частей электродов применяются только при сварке листовых металлических деталей. Довольно массовое применение имеют сварные соединения из таких сочетаний, как нелистовая деталь с нелистой деталью и листовая с нелистой, для выполнения которых используются электроды специальных форм, имеющие различные профили контактных поверхностей.

Так, при конденсаторной микросварке проволоки с листом для обеспечения постоянства площадок контактирования электрод — лист необходимо использовать электроды с плоской контактной поверхностью на их рабочей части квадратной или прямоугольной форм. Сварку проволок, трубок и прутков диаметром более 0,5 мм целесообразно выполнять электродами с вогнутой цилиндрической поверхностью рабочей части, а деталей с шаровой поверхностью — электродами с вогнутой сферической поверхностью. Во всех указанных случаях сварки на поверхности деталей практически отсутствуют следы меди от электродов, поскольку площадь контактирования электрод — деталь значительная, а плотность сварочного тока мала.

В тех довольно частых на практике случаях, когда доступ к местам сварки точек затруднен, должны применяться фигурные электроды. Важнейшим требованием к таким электродам является их механическая стойкость к изгибающим моментам, создаваемым воздействием усилия сжатия сварочной машины на ту часть фигурного электрода, которая смещена относительно оси его посадочной части, устанавливаемой в электрододержатель. Для уменьшения местной деформации от такого усилия конусных посадочных поверхностей электрода и электрододержателя фигурный электрод следует закреплять в последнем, например, с помощью хомута (рис. 76). Долговечность фигурного электрода может быть значительно увеличена благодаря применению на нем сменяемых рабочих частей.

В связи с дефицитностью ряда марок электродных металлов и сплавов, а также для экономии последних рационально расширять применение для точечной сварки составных электродов, в которых основная часть изготавливается из меди, а рабочая — из требуемого по технологии электродного сплава.

Обычным при рельефной сварке является [54] применение электродов с плоской контактной поверхностью (круглой, прямоугольной и др.), размеры которой больше размеров сварного соединения.

Поэтому номинальная площадь соприкосновения [70] таких электродов со свариваемыми деталями превышает аналогичную площадь в точечных соединениях. В связи с этим плотность сварочного тока и давление при рельефной сварке получаются меньшими, что облегчает условия работы электродов и удлиняет срок их службы.

Электроды для рельефной сварки разделяются, в основном, на три группы [54, 115]: предназначенные для сварки одного рельефа в листовых нахлесточных соединениях или Т-образной приварки одной детали; используемые при сварке группы точечных рельефов и рельефно-контурной сварке преимущественно нахлесточных соединений; обеспечивающие токоподвод к боковым поверхностям привариваемых деталей в Т-образных и некоторых других видах рельефной сварки.

Электроды первых двух групп имеют развитую плоскую контактную поверхность рабочей части и практически не отличаются от электродов для точечной сварки с аналогичной поверхностью, за исключением наличия выемок для выступающих частей свариваемых деталей (см. рис. 66, *б—ж*). В тех случаях, когда одна из свариваемых деталей при установке между электродами может контактировать с одним из них (см. рис. 66, *б, е*), в углубление такого электрода запрессовывают изолированную втулку, наружный диаметр которой должен быть равен диаметру указанного углубления. Сварка соединения типа трубка — лист (см. рис. 66, *д*) должна выполняться электродом с конусной поверхностью, расположенной под углом 45° к продольной оси привариваемой трубки.

При одновременной групповой сварке рельефов [54], выполненных на деталях толщиной 0,8—3,0 мм габаритных конструкций, целесообразно использовать составные электроды, на основаниях которых крепятся сменные рабочие части [54]. Крепление этих частей осуществляется [67] путем запрессовки, посадки на конус или «ласточкин хвост», резьбового соединения, пайки и др.

2. Охлаждение и зачистка электродов

При точечной и рельефной конденсаторной сварке тепловое состояние электродов в каждый момент их работы зависит не только от температуры в контактах электроды — детали $T_{\text{ад}}$, но и от степени нагрева рабочей и средней (наиболее массивной) частей электродов током $I_{\text{св}}$. Однако, как правило, сечение рабочей, и тем более средней, части электродов для точечной конденсаторной сварки бывает довольно большим, поэтому их нагрев непосредственно сварочным током обычно получается незначительным. Главными источниками нагрева электродов являются тепловыделения в контактах электроды — детали ($Q_{\text{ад1}}$ и $Q_{\text{ад2}}$) и теплопередача в электроды от разогреваемого металла свариваемых деталей.

Анализируя роль каждого из этих двух источников нагрева электродов при точечной конденсаторной сварке, можно отметить следующее:

1) для точечной микросварки, выполняемой на режимах с небольшими $t_{\text{св}}$ и малыми усилиями сжатия $F_{\text{сж}}$, когда контактные сопротив-

ления электроды — детали велики, характерно более заметное влияние на нагрев электродов тепловыделения за счет этих сопротивлений, а теплопередача от нагретых свариваемых деталей при этом не очень существенна (в первую очередь в связи с весьма малыми объемами ядра точек); при этом общий нагрев электродов получается настолько незначительным, что оказывается вполне достаточным их естественное охлаждение (даже при высоком темпе работы), а поэтому в маломощных конденсаторных машинах искусственное охлаждение электродов не предусмотрено;

2) при точечной конденсаторной сварке металлов толщиной более 0,8—1,0 мм, когда время $t_{св}$ и ток $I_{св}$ существенно возрастают, значительно увеличивается нагрев электродов как за счет теплопередачи от разогреваемых свариваемых деталей (ввиду значительно большего, чем при микросварке, объема ядра точек), так и от нагретых участков металла в контактах электроды — детали (из-за существенно возросших по сравнению с микросваркой значений тока $I_{св}$ и времени $t_{св}$ здесь также выделяется много тепла). В целом электроды при точечной конденсаторной сварке металлов толщиной более 0,8—1,0 мм нагреваются довольно значительно [52, 175], и даже при небольшой производительности сварочных машин требуется применение искусственного (обычно водяного) их охлаждения, что практически всегда обеспечивается конструктивным исполнением таких машин.

Основной операцией, позволяющей сохранять чистую и гладкую контактную поверхность рабочих частей электродов разных форм, является их зачистка (рис. 77), периодичность которой должна устанавливаться в каждом конкретном случае в зависимости от марок свариваемых металлов и металла электродов, производительности сварки и температурного режима работы электродов, требований к внешнему виду сварных соединений и др. Зачистка контактных поверхностей электродов практически всегда производится непосредственно в сварочной машине, причем во всех случаях она выполняется при сжатых небольшим усилием электродах.

Для зачистки сферической контактной поверхности электродов рекомендуется [216] применять резиновую пластину, покрытую с обеих сторон абразивным полотном.

Во всех случаях обработки электродов напильником (надфилем) необходимо после этой операции произвести зачистку их контактных поверхностей абразивным полотном, причем с повышением требований к внешнему виду сварных соединений необходимо, чтобы зернистость такого полотна уменьшалась.

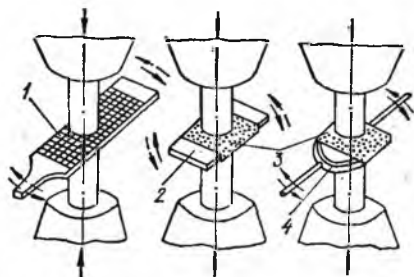


Рис. 77. Способы зачистки цилиндрических, сферических и конических электродов (имеющих плоскую и сферическую контактные поверхности): 1 — напильник (надфиль); 2 — резиновая подушка; 3 — абразивное полотно; 4 — заправник.

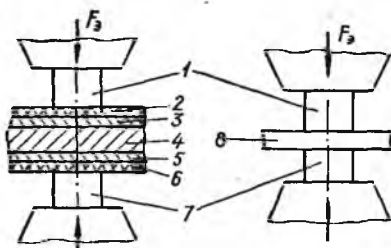


Рис. 78. Схема проверки параллельности контактных поверхностей рабочих частей цилиндрических и конических электродов:

1, 7 — рабочие части электродов; 2, 6 — копировальная бумага; 3, 5 — тонкая белая бумага; 4 — стальная пластинка; 8 — пластинка из тонкого картона.

Безусловно, полезной, а нередко и необходимой (особенно при микро-сварке) является полировка плоских контактных поверхностей электродов. Эта операция выполняется аналогично схеме, приведенной на рис. 77, а, но вместо напильника должна применяться стальная закаленная и отполированная пластинка толщиной 0,8—2,0 мм.

После выполнения определенного количества сварных точек рабочая часть электродов всех форм недопустимо изнашивается и в таких случаях уже требуется не зачистка, а восстановление — заправка изношенных

участков рабочей части электродов. Последняя должна выполняться непосредственно в сварочной машине — специальными ручными заправщиками с резцами или пристраиваемыми к машине фрезерными головками [216]; вне сварочной машины — обработкой рабочей части электродов на токарном станке или в специальном стационарном устройстве [216]. После заправки и зачистки конических и цилиндрических электродов рабочие части последних при точечной конденсаторной сварке листовых металлов должны находиться в сварочной машине в таком положении, чтобы их контактные поверхности были между собой параллельными. Схема проверки такого положения рабочих частей электродов с плоской круглой контактной поверхностью показана на рис. 78.

Что касается взаимного положения в сварочной машине рабочих частей сферических электродов, то основным требованием (как и при сварке листовых металлов) является соосная установка таких электродов. При наличии на рабочих частях сферических электродов плоской контактной поверхности диаметром d_0 необходимо, чтобы эти поверхности были параллельными.

3. Материалы для электродов

К основным требованиям, предъявляемым к электродным материалам, следует отнести высокую жаропрочность, горячую твердость при достаточно высокой электро- и теплопроводности, а также низкую способность к схватыванию с металлом свариваемых деталей.

В соответствии с работой [216] материалы для электродов в зависимости от их назначения разделяются на следующие три класса: со средними значениями твердости и электропроводности — для сварки наиболее широко применяемых в промышленности малоуглеродистых и конструкционных сталей; с высокими твердостью (в холодном и нагретом состояниях) и жаропрочностью — при необ-

ходимости выполнения сварки нержавеющей сталей и жаропрочных сплавов; с повышенной электропроводностью — для сварки легких сплавов, обладающих высокой электро- и теплопроводностью.

Состав, основные свойства и области применения ряда электродных материалов, рекомендуемых для точечной и рельефной конденсаторной сварки, приведены в табл. 30.

Повышенные требования к тепло- и электропроводности электродов обуславливают выбор меди (легированной хромом, кадмием, кобальтом, цинком, цирконием, бериллием, серебром и др.) как основного материала для их изготовления. Холоднотянутая медь, хотя еще широко применяется (так как электродные сплавы на основе меди выпускаются в сравнительно малом объеме и все еще дефицитны), имеет низкое сопротивление деформации при повышенной температуре.

Основным из указанных выше требований в значительной мере отвечают дисперсионно-твердеющие электродные сплавы (систем $\text{Cu} - \text{Cr}$, $\text{Cu} - \text{Cr} - \text{Zr}$; $\text{Cu} - \text{Co} - \text{Be}$ и др.), прошедшие термомеханическую обработку. Оптимизация и выполнение режимов такой обработки являются одним из эффективных способов повышения стойкости электродов [173].

За последние годы разработаны и успешно прошли опытно-промышленную проверку [41, 42, 222] новые материалы для контактной сварки сопротивлением (в том числе точечной и рельефной конденсаторной), представляющие собой дисперсно-упрочненную медь с добавками тугоплавких оксидов Al_2O_3 и ZrO_2 . По сравнению с рядом электродных сплавов новые материалы менее склонны к взаимодействию со свариваемыми металлами, они также имеют более высокую жаропрочность и твердость в горячем состоянии. Основные физико-механические свойства нескольких марок таких электродных материалов приведены в табл. 31.

Технология получения такой дисперсно-упрочненной меди состоит из следующих основных этапов. Исходные порошки металла и оксида смешиваются в шаровой мельнице на протяжении 4—8 ч, прессуются в брикеты требуемых размеров, спекаются при 800—900 °С в восстановительной среде, затем подвергаются горячей экструзии и холодному волочению.

Новые электродные материалы были испытаны при точечной контактной сварке (на машинах переменного тока и конденсаторных) различных металлов и сплавов толщиной до 0,7 + 0,7 мм в лабораторных условиях, а также в условиях крупносерийного производства предприятий приборостроительной и радиоэлектронной промышленности.

Снижение склонности испытанных электродных материалов к взаимодействию со свариваемыми металлами иллюстрируют опытные данные, приведенные в табл. 32, показывающие, что такой показатель стойкости электродов, как число сварных точек до их зачистки, у электродов из дисперсно-упрочненной меди примерно в 2—5 раз больше, чем у медных сплавов.

Таблица 30. Химический состав, основные свойства, режимы термомеханической

Металлы	Состав, %	Основные				
		Электропроводность *, % (к чистый медь)	Теплопроводность *, Вт/(м·°С)	Твердость (после термомеханической обработки) НВ, ГПа, при		Предел прочности (при 20 °С), ГПа
				20 °С	400 °С	
Медь холоднокатаная М1	Cu 99,9; примеси 0,1	98	409—365	0,78	—	0,36
Бронза серебряная БрСр1	Ag 0,07—0,12; Cu остальное	93—97	382—358	0,93—0,98	0,70	0,43
Бронза кадмиевая БрКд1 (МК)	Cd 0,9—1,2; Cu остальное	76—93	326—348	0,93—1,12	0,90	0,41
Бронза хромокадмиевая БрХКд-0,5-0,3 (Мц5Б)	Cr 0,2—0,4; Cd 0,2—0,35; Cu остальное	80—95	—	1,18—1,23	—	—
Бронза хромовая БрХ	Cr 0,4—1,0; Cu остальное	85—96	386—351	1,27—1,47	0,93	0,44
Бронза хромоциркониевая БрХЦр	Cr 0,4—1,0; Zr 0,03—0,08; Cu остальное	85—96	382—350	1,37—1,56	1,04	0,49
Бронза никельбериллиевая БрНБТ	Ni 1,4—1,6; Be 0,2—0,4; Ti 0,05—0,15; Cu остальное	43—65	186—253	1,66—2,35	1,86	0,80
Псевдосплавы вольфрам — медь	W 50—70; Cu остальное	20—45	—	1,66—2,44	—	—
Молибден МЧ	Ni 0,005—0,03; Si 0,03; Mo остальное	34—37	143	2,15—2,94	—	0,8—0,9
Вольфрам	W 100	30—32	168	3,92—4,41	—	0,8—1,1

* Для всех материалов (кроме меди, псевдосплавов вольфрам — медь, молибдена и воль-

** Деформация бронз БрХКд, БрХ и БрХЦр выполняется перед отпуском.

Таблица 31. Основные физико-механические свойства дисперсно-упрочненной меди [41, 42, 71]

Материал	Электропроводность, % к электропроводности меди	σ_B	σ_B (500 °С)	НВ	δ , %
		ГПа			
МЗА	80—82	0,392—0,412	0,186	1,37—1,47	20,0
МЗЦ	85—87	0,342—0,373	0,176	1,27—1,37	19,2
М10А	65—70	0,441—0,490	0,078	1,76—1,96	16,0
М10Ц	70—72	0,412—0,442	0,074	1,76—1,96	15,2

обработки и области применения электродных материалов

свойства	Термомеханическая обработка					Область применения
Температура рекристал- лизации, °С	Закалка		Отпуск		Деформа- ция **, %	
	Температу- ра, °С	Выдерж- ка, ч	Темпера- тура, °С	Вы- держ- ка, ч		
200	—	—	—	—	50	Сварка алюминиевых, медных и магниевых сплавов То же
350	—	—	—	—	50	
350	760—780	2—3	—	—	40—60	
350—400	940—960	0,5—1,0	470—490	4	20—30	Сварка сталей раз- личных марок, ти- тана, никеля, мед- ных сплавов То же
370—420	980—1000	1,5—2,0	460—480	5	* 15—30	
500	940—960	1,5—2,0	470—490	4	40—60	
510	900—950	2,0—2,5	475—550	2—3	—	Сварка коррозионно- стойких и жаро- прочных сталей, ти- тана Сварка серебра, пла- тины, золота, меди То же
900—1000	—	—	—	—	—	
850	—	—	—	—	—	
1000	—	—	—	—	—	» »

фрама) электро- и теплопроводность даны в диапазоне изменения температуры 20—700 °С.

Т а б л и ц а 32. Результаты испытаний электродов из медных сплавов и дисперсно-упрочненной меди

Металл (d, δ, мм)	Число точек до зачистки электродов	
	Из серийных сплавов (МЦ5Б, БрХ)	Из дисперсно-упрочненной меди
Никель НП2, d = 0,3 + никель НП2, δ = 0,1	3200	5200
Нейзильбер, d = 1,0 + никель НП2, δ = 0,1	1500	3000
Сталь 12Х18Н10Т, δ = 0,2 + константан, d = 0,8	980	1400
Сталь 08кп, δ = 0,1 + сталь 08кп, δ = 2,5	400	2000
Ковар Н29К18, d = 0,7 + сталь армко, δ = 1,2	1000	2500

Следует также отметить, что новые электродные материалы не требуют дополнительной термомеханической обработки и их целесообразно использовать не только при точечной и рельефной конденсаторной микросварке, но и при сварке металлов толщиной 0,8—2,5 мм. Перспективными являются и электродные материалы из так называемых внутреннеокисленных сплавов [173], также относящихся к дисперсно-упрочненным материалам. В этих сплавах стабильная структура с мелкодисперсными частицами оксидов получается методом внутреннего окисления. Испытания одного из таких сплавов¹ при сварке алюминиевых сплавов Д16Т и АМц толщиной 1,2—2,5 мм показали, что они обладают стойкостью, в несколько раз превышающей стойкость обычных электродных сплавов.

¹ Стойкость электродов определялась числом точек до подлипания контактной поверхности к свариваемому материалу.

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ТОЧЕЧНОЙ И РЕЛЬЕФНОЙ КОНДЕНСАТОРНОЙ СВАРКИ

1. Классификация и основные узлы оборудования

Оборудование для точечной и рельефной конденсаторной сварки классифицируют по следующим признакам: назначению (универсальное и специализированное); мощности (маломощное — $W_k \leq 1$ кДж; средней мощности — $W_k = 1 \div 5$ кДж; мощное — $W_k > 5$ кДж); числу одновременно свариваемых точек (одноточечное, двухточечное и многоточечное); способу установки (стационарное и передвижное); роду действия (неавтоматическое, полуавтоматическое и автоматическое); условиям выполнения сварочных операций (в стационарных и монтажных условиях); способу подвода тока (для двусторонней и односторонней сварки); системе усилия сжатия; приводу механизма сжатия; направлению перемещения подвижного электрода (с вертикальным, горизонтальным и радиальным ходами).

Основой классификации механизмов сжатия оборудования для контактной сварки является их деление по разновидностям систем, которые создают необходимые для сварки усилия сжатия, а именно: благодаря массе груза, силе сжатия пружины, давлению воздуха (или жидкости), силе электромагнита, тепловому расширению нагреваемого металла и др.

Системы привода относятся только к подъему и опусканию электродов точечных и рельефных машин. Это можно выполнять ножной педалью, вручную рычагами, электродвигателями и др. Поэтому, например, такие выражения [52], как «педальный привод точечных машин» или «рычажный привод сжатия деталей» характеризуют только систему привода (педальная, рычажная) и совсем не раскрывают главное в данном вопросе — систему создания усилия сжатия. Можно также отметить, что и такой термин, как «моторно-кулачковый привод» [52], совершенно не раскрывает того, что в нем применена пружинная система сжатия, а поэтому и он характеризует только систему привода. Наконец, не полностью отражают сущность вопроса и даже неправильны такие термины, как [175] «пневмопривод», «гидропривод», «дилатометрический привод» и им подобные.

Более правильна и точна следующая классификация систем основных механизмов оборудования для точечной и рельефной контактной конденсаторной сварки.

1. Системы усилия сжатия (сварочного усилия): грузовая; пружинная (с цилиндрическими или плоскими пружинами); рычажная (ручная); пневматическая; гидравлическая; электромагнитная; дилатометрическая.

2. Системы привода (подъема и опускания) электродов: рычажная (ручная); педальная (ножная); моторная (электродвигателем); пневматическая; гидравлическая.

Оборудование для точечной и рельефной конденсаторной сварки состоит из следующих основных узлов: конденсаторной батареи; электросиловой части (выпрямительное и включающее устройства, сварочный трансформатор, сварочный контур, переключатели ступеней трансформатора, групп емкостей конденсаторов и напряжения их зарядки); системы управления последовательностью операций цикла сварки и регулирования его параметров; механизма сжатия; привода электродов.

Обычным режимом работы всех конденсаторных машин является повторно-кратковременный, при котором период включения (работы) машины чередуется с периодом ее отключения (паузы). Такой режим принято оценивать отношением продолжительности работы ко всему циклу:

$$\text{ПВ } \% = \frac{t_{\text{св}}}{t_{\text{ц}}} 100, \quad (\text{VII.1})$$

где $t_{\text{ц}}$ — продолжительность всего цикла сварки (сумма продолжительностей сварки и паузы).

При всех способах конденсаторной сварки обычными являются весьма небольшие значения $t_{\text{св}}$ и обусловленные этим малые ПВ (при неавтоматической точечной конденсаторной сварке значения ПВ колеблются в пределах нескольких долей процента).

2. Электрические устройства

Электрические устройства для точечной и рельефной конденсаторной сварки можно разделить на две большие группы. К первой группе, получившей преимущественное распространение, относятся устройства, обеспечивающие зарядку батареи конденсаторов C_p до выбранного уровня напряжения U_c и поддерживающие этот уровень сколько угодно долго. Разряд батареи конденсатора C_p на первичную обмотку сварочного трансформатора или непосредственно на свариваемые детали осуществляется в любой выбранный сварщиком (оператором, автоматическим устройством) момент времени при достижении на свариваемых деталях заданного усилия F_a .

В устройствах этого типа (рис. 79, а) зарядка конденсаторов C_p осуществляется выпрямительными устройствами, рассмотренными выше (см. параграф 1, гл. II). При достижении равенства напряжения U_c на C_p и напряжения срабатывания порогового устройства 2 последнее выключает управляемый вентиль выпрямительного устройства 1 и зарядка C_p прекращается. Если напряжение U_c на C_p по-

нижается (за счет тока утечки), устройство 2 включает выпрямительное устройство 1 и происходит дозарядка C_p . При сжатии свариваемых деталей с заданным усилием F датчик усилия 5 дает разрешение на включение управляемого вентиля 3 и C_p разряжается на сварочный трансформатор 4 (или свариваемые детали).

Ко второй группе относятся электрические устройства (рис. 79, б), в которых зарядка конденсаторов C_p начинается только при достижении на свариваемых деталях заданного усилия F_0 (разрешение на включение выпрямительного устройства 1 дает датчик усилия 5). Когда наступает равенство напряжения на C_p и напряжения срабатывания порогового устройства 2, последнее включает управляемый вентиль 3 и C_p разряжается на сварочный трансформатор 4 (или свариваемые детали). Для того чтобы зарядный ток не протекал через сварочный трансформатор 4, его первичную обмотку необходимо шунтировать неуправляемым вентилям 6 [186].

Использование электрических устройств первого типа позволяет при всех прочих равных условиях (производительности, толщине свариваемого металла и др.) уменьшить установленную мощность зарядной цепи, так как возрастает время, в течение которого могут заряжаться конденсаторы C_p . Устройства второго типа отличаются простотой и их следует в основном использовать в тех случаях, когда не требуется обеспечение высокой производительности, а также при невысокой квалификации обслуживающего персонала (наладчиков).

Электрические устройства для конденсаторной микросварки. Наиболее простым электрическим устройством первой группы является устройство, обеспечивающее зарядку C_p до одного уровня U_c (например, 600 В или 1000 В) с помощью феррорезонансного стабилизатора, который широко использовался в серийных машинах типа ТКМ-7 и ТКМ-8. Принцип работы этого устройства (рис. 80) заключается в следующем [155]. При подаче напряжения на входные зажимы через контакты выключателя Q поступает питание на первичную обмотку стабилизатора $Tr1$ и трансформатора $Tr2$. С обмотки $W2$ трансформатора $Tr2$ выпрямленное мостом $V5$ напряжение через контакты кнопки $K1$ подается на управляющий электрод симистора $V1$, который открывается, — начинается зарядка рабочих конденсаторов $C1—C6$ (зарядка максимальной емкости длится не более 0,5 с) через стабилизирующий зарядный трансформатор $Tr1$.

При сжатии электродов машины с выбранным по режиму сварки усилием F_0 включается кнопка $K1$, прекращается зарядка конденсаторов $C1—C6$ (на управляющий электрод $V1$ напряжение не подается) и с обмотки $W3$ $Tr2$ выпрямленное мостом $V4$ напряжение

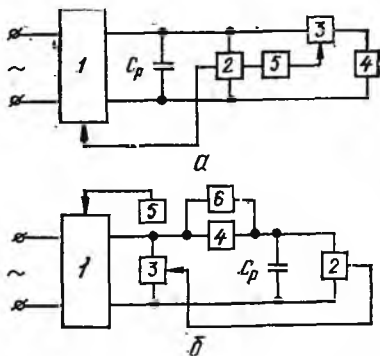


Рис. 79. Функциональные блок-схемы электрических устройств для точечной и рельефной конденсаторной сварки.

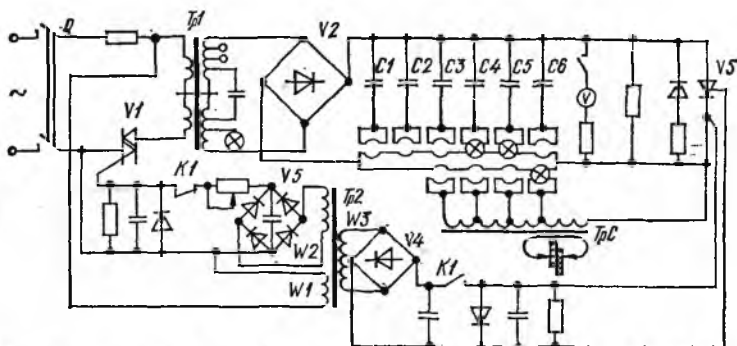


Рис. 80. Электрическое устройство конденсаторной машины ТКМ-7М.

подается на управляющий электрод тиристора $V5$ (через контакты кнопки $K1$). Происходит разряд батареи конденсаторов $C1—C6$ на первичную обмотку сварочного трансформатора TrC и сварка деталей током, индуктированным во вторичной его обмотке. В этом устройстве отклонение напряжения U_c от заданного составляет не более $\pm 2\%$.

В гл. III показано, что для повышения качества и надежности точечных и рельефных микросварных соединений необходимо использовать комбинированные циклы нагрева зоны соединения. Поэтому в последнее время преимущественное распространение получили устройства для конденсаторной микросварки первой группы, обеспечивающие циклы подогрев — сварка и подогрев — пауза — сварка. Различные типы таких устройств приведены в гл. III. В связи с этим ниже рассмотрены те устройства этой группы, которые использованы в серийно выпускаемом оборудовании для точечной и рельефной конденсаторной микросварки (в том числе крупными и мелкими сериями).

Электрическое устройство серийной машины ТКМ-17, обеспечивающее цикл подогрев — сварка (см. рис. 52, $\partial—з$), приведено на рис. 81¹. Оно состоит из следующих основных узлов: сварочного трансформатора, дросселя, выпрямительного, разрядного и измерительного устройств, блока конденсаторов, блоков управления выпрямительным и разрядным устройством, а также аварийным отключением.

Сварочный трансформатор TrC собран на сердечнике броневое типа и состоит из двух обмоток: первичная обмотка имеет восемь катушек галетного типа, соединенных последовательно, причем соответствующие соединения выводов катушек подключены к гнездам штепсельного переключателя $Шт4$ (k_7); вторичная обмотка имеет один виток, состоящий из девяти параллельно соединенных медных пластин. Перемычки, соединяющие эти пластины, являются выходными клеммами сварочного трансформатора. Катушки первичной обмотки установлены между пластинами вторичной обмотки.

¹ Электрическое устройство серийной машины ТКМ-15 отличается от устройства машины ТКМ-17 в основном схемой управления,

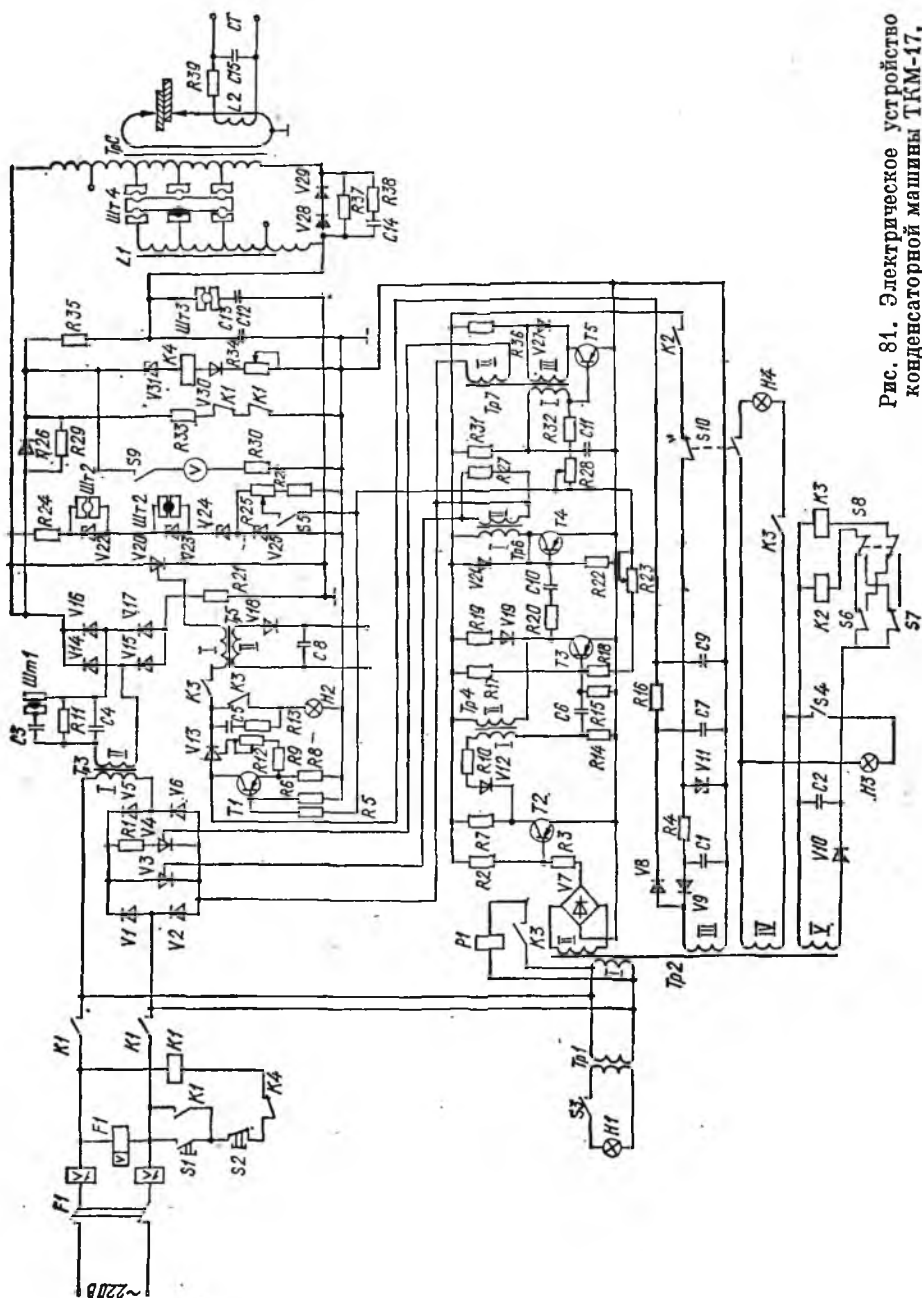


Рис. 81. Электрическое устройство конденсаторной машины ТКМ-17.

Дроссель $L1$ собран на тороидальном сердечнике и представляет собой многослойную катушку с отводами, которые подсоединены к гнездам штепсельного переключателя $III m4$ ($w_{др}$).

Выпрямительное устройство состоит из зарядного трансформатора $Tr3$, зарядного управляемого моста $V1—V6$, токоограничивающих конденсаторов $C3—C4$, выпрямительного моста $V14—V17$, диода $V26$, резисторов $R1, R11, R21, R29, R35$, штепсельного переключателя $III m1$.

С целью повышения точности стабилизации напряжения U_c на рабочих конденсаторах параллельно основному тиристор $V3$ подключен дополнительный тиристор $V4$ с токоограничивающим элементом. Введение последнего обусловлено следующими соображениями. Зарядный ток через основной тиристор $V3$ достаточно велик. Учитывая, что $V3$ может закрыться при прохождении сетевого напряжения через нуль, напряжение на конденсаторах достигает выбранного значения в различные моменты последнего полупериода. За счет этого возникает основная погрешность стабилизации. Введение тиристора $V4$ позволяет выполнять зарядку конденсаторов при подходе к выбранному уровню напряжения U_c малым током (основной тиристор $V3$ на это время отключается).

Блок рабочих конденсаторов состоит из секций параллельно соединенных конденсаторов $C12—C13$ (C_p), причем отводы от секции $C13$ подсоединены к гнездам штепсельного переключателя $III m3$.

Разрядное устройство состоит из управляемого вентиля $V20$ и блока диодов $V28$ и $V29$. К каждой паре этих диодов (с целью выравнивания обратного сопротивления, а также для плавного приложения напряжения) подсоединяется цепочка из резисторов $R37, R38$ и конденсатора $C14$.

Блок управления выпрямительным устройством содержит трансформатор $Tr2$, блокинг-генератор, блок синхронизации зарядного тока с сетевым напряжением.

Блокинг-генератор состоит из резисторов $R28, R31, R32, R36$ конденсатора $C11$, диода $D27$, импульсного трансформатора $Tr7$ и тиристора $T5$. Узел синхронизации содержит резисторы $R2, R3, R7, R10, R14, R15, R17—R20, R22, R23, R27$, конденсаторы $C6$ и $C10$, диоды $V7, V12, V19, V21$, импульсные трансформаторы $Tr4$ и $Tr6$, транзисторы $T2—T4$. В блок управления также входят: цепочка стабилитронов $V22—V25$, резисторы $R24, R25, R26$ и выпрямитель, состоящий из диода $V9$, конденсатора $C1$, стабилитрона $V11$, резистора $R4$, а также штепсельный переключатель $III m2$ (напряжение зарядки ступенчато). В блок управления разрядным устройством входят источник питания, состоящий из диода $V8$, конденсатора $C7$, резистора $R16$, а также устройство управления разрядом, состоящее из резисторов $R5, R6, R8, R9, R12, R13$, транзистора $T1$, тиристора $V13$ и сигнальной лампы «Сварка» $H2$.

Измерительное устройство состоит из щитового вольтметра, кнопки $S9$ и резистора $R30$.

Блок аварийного отключения машины от сети состоит из цепочки последовательно соединенных стабилитронов $V31$, диода $V30$, реле $K4$ и резистора $R34$.

Кроме того, электрическое устройство машины содержит лампу освещения рабочего места *H1*, лампу локального освещения зоны сварки *H3* и сигнальную лампу (наладка) *H4*, магнитный пускатель *K1*, трансформатор *Tr1* (питание лампы *H1* освещения рабочего места), диод *V10*, конденсатор *C2*, реле *K2* и *K3*, микровыключатели *S6* и *S7*, переключатель *S8* «Привод» (ножной, пневматический), разрядный резистор *R33*, индикатор сварочного тока, переключатель режимов сварка — наладка *S10*.

Принцип работы электрического устройства машины ТКМ-17 заключается в следующем. При включении автомата *F1* и замыкании контактов кнопки *S1* включается магнитный пускатель *K1*, который своими контактами подключает к питающей сети трансформаторы *Tr1*, *Tr2*. При этом на обмотках *Tr6* (блок синхронизации с сетью) и *Tr7* (блокинг-генератор) генерируются импульсы, которые поступают соответственно в цепи управления тиристоров *V3*¹ и *V4*. Тиристоры *V3* и *V4* открываются и подключают трансформатор *Tr3* к питающей сети. Напряжение со вторичной обмотки *Tr3* через токоограничивающие конденсаторы *C3*, *C4* подается на выпрямитель *V14—V17*, начинается зарядка рабочих конденсаторов *C12*, *C13*. Регулировка напряжения зарядки рабочих конденсаторов производится изменением количества включенных стабилитронов *V22—V25*. При достижении на них напряжения пробоя (зависит от количества включенных стабилитронов *V22—V25*) через резисторы *R25*, *R26* начинает протекать ток. При этом напряжение с резистора *R25* подается на базы транзисторов *T3* и *T5*. При определенных величинах этого напряжения запирается транзистор *T3*, а затем *T5*. При этом из-за отсутствия импульсов на выходе синхронизатора и блокинг-генератора запираются тиристоры *V3* и *V4*, в результате чего прекращается зарядка рабочих конденсаторов *C12*, *C13*. Напряжения запираания транзисторов *T3* и *T5* регулируются резисторами *R23* и *R28* (транзистор *T3* запирается ориентировочно при 23 В, а *T5* — при 25 В).

При прекращении зарядки конденсаторов последние начинают разряжаться (за счет тока утечки) на стабилитроны *V22—V25*, диоды *V14—V17*, что требует периодической подзарядки конденсаторов *C12*, *C13* до установленного напряжения. Это достигается включением только тиристора *V4*. Вследствие разрядки и подзарядки на конденсаторах *C12*, *C13* возникают пульсации напряжения не выше 3 В (для того чтобы эти пульсации не превышали 3 В, необходимо подбирать величину токоограничивающих емкостей *C3*, *C4* [186]). Для исключения выхода из строя транзисторов *T3* и *T5* (в случае приложения к ним повышенного напряжения) параллельно резисторам *R25—R26*

¹ Импульсы управления, поступающие на тиристор *V3*, синхронизированы с сетью. Это позволяет исключить значительные броски тока, протекающего в зарядной цепи во время переходного процесса [186]. Схема синхронизации содержит преобразователь полупериодов сетевого напряжения в прямоугольные импульсы, синхронизированные с сетью (транзистор *T2*); блокинг-генератор, генерирующий пакеты импульсов (транзистор *T3*) и усилитель мощности (транзистор *T4*).

подключен стабилитрон $V25$, падение напряжения на котором не превышает 33 В.

С помощью резистора $R25$ можно производить плавную регулировку напряжения на конденсаторах на всех положениях ступенчатой регулировки этого напряжения.

В цепи управления разрядного тиристора $V20$ имеется пороговое устройство, предназначенное для исключения при нажатии на педаль машины возможности разряда рабочих конденсаторов до достижения на них заданной величины напряжения. Данное устройство работает следующим образом.

При достижении напряжением U_c установленного значения напряжение с резистора $R25$ (ориентировочно 25 В) поступает на вход транзистора $T1$, в результате чего на резисторе $R8$ появляется напряжение, которое через резисторы $R9$, $R12$, контакт $K3$ и лампу накаливания $H2$ подается в управляющую цепь тиристора $V13$. В результате этого тиристор $V13$ открывается, загорается лампа $H2$, сигнализирующая о достижении на конденсаторах $C12$, $C13$ заданной величины напряжения и возможности включения разрядного тиристора $V20$. Если тиристор $V13$ закрыт, включение разрядного тиристора $V20$ не произойдет.

При нажатии на педаль машины и достижении на электродах заданного усилия сжатия срабатывает микропереключатель $S6$ (при ножном приводе) или $S7$ (при пневматическом приводе) и реле $K3$. Нормально замкнутые контакты этого реле размыкают цепь питания лампы $H2$, а нормально разомкнутые контакты замыкают цепь управления тиристора $V20$, после чего начинается разряд конденсаторов $C12$ — $C13$ по двум цепям: первая цепь — блок диодов $V28$ — $V29$ и первичная обмотка трансформатора TrC , вторая — дроссель насыщения $L1$ и часть первичной обмотки трансформатора TrC . Вначале дроссель $L1$ ненасыщен (имеет большое индуктивное сопротивление) и ток, в основном, протекает по первой цепи, после насыщения $L1$ его индуктивное сопротивление резко падает и ток начинает протекать по второй цепи, шунтируя первую цепь. В результате во вторичной обмотке сварочного трансформатора TrC индуцируется импульс тока (см. рис. 52, ∂ — $з$), у которого передний фронт имеет ступеньку, обусловленную тем, что вначале конденсаторы $C12$, $C13$ разряжаются на всю первичную обмотку сварочного трансформатора, а после насыщения $L1$ — на часть этой обмотки.

Во время разряда конденсаторов $C12$, $C13$ дозарядка их исключается прекращением подачи питания в блок синхронизации и блокинг-генератор (за счет размыкания контактов реле $K2$). При отпускании педали электрическое устройство возвращается в исходное состояние. Для наблюдения импульса сварочного тока на экране осциллографа источник питания снабжен индикатором (состоит из катушки индуктивности $L2$ и интегральной цепочки $R39$ и $C15$), который крепится к шине сварочного трансформатора TrC . При прохождении импульса сварочного тока на выходе катушки $L2$ индуцируется напряжение, поступающее на вход интегральной цепочки. Напряжение, которое снимается с конденсатора $C15$ и подводится к розетке CT (сва-

рочный ток), пропорционально сварочному току.

Для внешнего запуска осциллографа, синхронно с началом роста сварочного тока, в цепь управления тиристора $V20$ включен трансформатор синхримпульсов $Tr5$.

Если при зарядке напряжение U_c на рабочих конденсаторах превысит предельно допустимую величину, срабатывает блок аварийного выключения машины (происходит пробой стабилитрона $V31$, выбранного на небольшое превышение предельно допустимого напряжения), включается реле $K4$, контакты которого размыкают цепь питания реле $K1$. После этого машина отключается от питающей сети.

Контроль напряжения на рабочих конденсаторах производят с помощью вольтметра V при нажатии на кнопку $S9$.

С целью соблюдения мер техники безопасности предусмотрен разряд конденсаторов $C12$, $C13$ через нормально замкнутые контакты $K1$ на резистор $R33$, причем это происходит при принудительном выключении реле $K1$ кнопкой $S2$ и размыкании контактов конечных выключателей (на схеме не показаны), находящихся соответственно под предохранительной крышкой штепсельных переключателей $Шм1$ — $Шм4$ и крышками машины.

В режиме наладки схема предусматривает включение сигнальной лампы $H4$ (через контакты тумблера $S10$ и реле $K3$) при достижении требуемого усилия сжатия F_a , что значительно облегчает его установку. Счет числа сваренных точек осуществляется счетчиком $P1$.

Погрешность стабилизации напряжения U_c , обеспечиваемая этим источником, не превышает $\pm 1\%$.

Широкие технологические возможности обеспечивает использование электрических устройств, содержащих не менее двух батарей рабочих конденсаторов [137, 149, 150], что позволяет регулировать временной интервал между импульсами токов $i_{под}$ и $i_{св}$ при независимой установке уровня напряжения на подогревной C_{II} и сварочной C_p батареях конденсаторов (см. рис. 52, $u-a$).

В отличие от рассмотренного выше (см. рис. 81), такое электрическое устройство содержит две батареи конденсаторов, два выпрямительных и разрядных устройства. Регулировка указанного выше временного интервала осуществляется специальным синхронизирующим устройством. Принцип работы двухбатарейного электрического устройства для конденсаторной сварки рассмотрен в гл. III.

Двухбатарейное электрическое устройство применено в серийной машине ССП-5 и машине ТКМ-21 (МТК-501), подготовленной к серийному производству. Погрешность стабилизации U_c здесь также не превышает $\pm 1\%$.

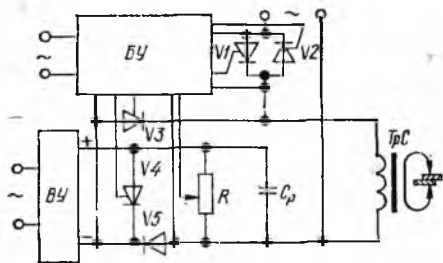


Рис. 82. Электрическое устройство конденсаторной машины МТК-2001.

Хорошие технологические возможности точечной и рельефной конденсаторной сварки имеют электрические устройства, в которых сварка деталей осуществляется разрядным током конденсаторов, а подогрев и отжиг — переменным током (см. рис. 52, $m-o$).

Принцип работы таких устройств (рис. 82) заключается в следующем. Сначала на пульте управления устанавливаются параметры требуемого термического цикла. Затем при подключении к сети выпрямительного устройства $ВУ$ конденсаторы C_p заряжаются до заданного напряжения U_c , установленного делителем R , причем стабилизация U_c осуществляется блоком управления $БУ$. После приключения к свариваемым деталям заданного усилия F_s $БУ$ обеспечивает сначала включение тиристоров $V1$ и $V2$ (в результате чего через сварочный трансформатор TrC проходит ток подогрева), а затем (после их выключения) — тиристоры $V3$ и $V4$ (при этом конденсаторы C_p за счет вентили $V5$ разряжаются на первичную обмотку TrC). После прохождения импульса сварочного тока блок управления обеспечивает включение тиристоры $V1$ и $V2$, в результате чего осуществляется термообработка свариваемых деталей.

Фактически рассмотренное электрическое устройство содержит два устройства для контактного нагрева свариваемых деталей: рядом конденсаторов C_p (оно практически мало отличается от устройства, приведенного на рис. 81) и переменным током (не отличается от аналогичных источников переменного тока [46, 52, 54, 60, 75, 76]). Это комбинированное устройство использовано в серийной машине для точечной и рельефной конденсаторной сварки типа СС-7 и машине МТК-2001, подготовленной к серийному производству.

Из электрических устройств второго типа, которые использованы в серийных машинах типа ТКМ-14 (К-535) и ССП-3, следует отметить двухимпульсные устройства [127, 128, 188, 191, 193, 268, 274]. Работа таких устройств основана на том, что рабочие конденсаторы дважды заряжаются до разных уровней напряжения и разряжаются на сварочный трансформатор, причем первый разрядный импульс тока (по амплитуде он меньше, чем второй) обеспечивает подогрев деталей, а второй (следующий за первым с паузой) — сварку деталей.

Рассмотрим работу (рис. 83) одного из таких электрических устройств [219]. В исходном состоянии симистор $V1$ выключен и напряжение питания не подается на трансформаторы $Tr1$ и $Tr2$, конденсаторы не заряжены. При достижении на электродах требуемого усилия F_s кнопка K замыкает цепь питания симистора $V1$ (от источника E через резистор $R8$), он включается и начинается зарядка конденсаторов C_p от выпрямителя $V2$ через реактивный токоограничивающий элемент Z и диод $V4$. Одновременно напряжение сети подается на источник постоянного напряжения (вторичная обмотка $Tr2$, диод $V3$), происходит зарядка конденсаторов $C1-C3$. При достижении на C_p уровня напряжения, выбранного с помощью делителя $R1$, включается динистор $V11$ и конденсатор $C1$ разряжается через $V11$, диод $V10$, конденсатор $C2$ и управляющую цепь тиристора $V5$. Последний включается, и происходит разряд C_p на сварочный транс-

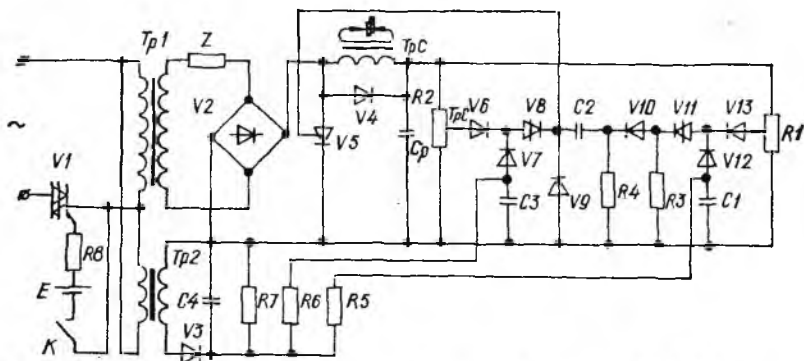


Рис. 83. Электрическое устройство конденсаторной машины ССП-3М.

форматор TrC , что обеспечивает подогрев деталей. Конденсатор $C2$ разряжается и запирает цепь управления тиристора $V5$. Он выключается, и начинается повторная зарядка C_p до более высокого уровня напряжения U_c , установленного делителем напряжения $R2$, так как динистор $V11$ находится во включенном состоянии (через него протекает ток от источника напряжения через резисторы $R5$, $R3$ и диод $V12$). При достижении этого уровня U_c включается динистор $V8$, конденсатор $C3$ разряжается на управляющую цепь тиристора $V5$, что обеспечивает включение этого тиристора и разряд конденсаторов C_p на трансформатор TrC . В результате этого через свариваемые детали проходит импульс сварочного тока. Так как через управляющую цепь тиристора $V5$, резистор $R6$, диод $V7$ и динистор $V8$ протекает ток от источника напряжения, то выпрямитель $V2$ зашунтирован открытым $V5$ и зарядка C_p не происходит. После отпускания кнопки K выключаются симистор $V1$, тиристор $V5$, динисторы $V8$ и $V11$, разряжаются конденсаторы $C1—C4$ и схема возвращается в исходное состояние. По сравнению с другими двухимпульсными источниками питания [127, 188], в данном источнике повышена точность стабилизации U_c (погрешность не превышает $\pm 1\%$) за счет того, что интегрирующее действие конденсаторов $C1$ и $C3$ отсутствует (последние предварительно заряжены и подключены к делителям через диоды $V6$, $V7$, $V12$ и $V13$).

Электрические устройства для бестрансформаторной конденсаторной микросварки отличаются от рассмотренных выше только отсутствием сварочного трансформатора, а также использованием понижающего выпрямительного трансформатора вместо повышающего. В связи с этим схемы бестрансформаторных конденсаторных источников питания здесь отдельно не приводятся.

Электрические устройства для конденсаторной сварки металлов толщиной более 0,8 мм. Электрические устройства для конденсаторной сварки металлов толщиной более 0,8 мм относятся, в основном, к первой группе. Они широко используются в серийных машинах типа МТК и МРК [78, 79, 101, 102, 106, 107] для точечной и рельефной конденсаторной сварки.

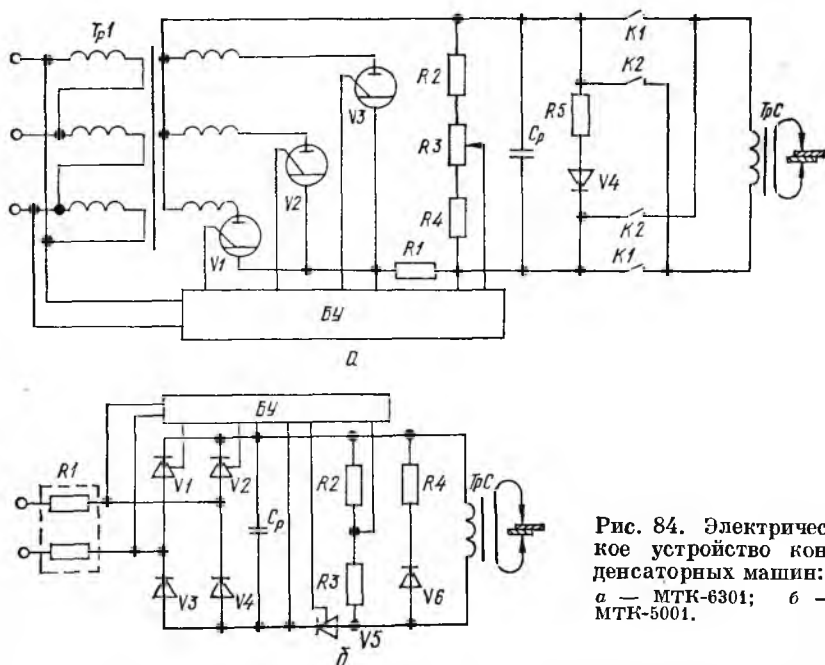


Рис. 84. Электрическое устройство конденсаторных машин:
 а — МТК-6301; б — МТК-5001.

В настоящее время в промышленности эксплуатируются электрические устройства, выполненные на старой (игнитроны, тиратроны, электровакуумные приборы и др.) и новой (тиристоры, транзисторы, микросхемы и др.) элементной базе. Типичным представителем первого типа является электрическое устройство серийной машины МТК-6301 (рис. 84, а). Здесь конденсаторы C_p заряжаются с помощью трехфазного однополупериодного выпрямителя на игнитронах $V1—V3$ через омический токоограничитель $R1$ от трансформатора $Tp1$. Включение игнитронов $V1—V3$ осуществляется блоком управления $БУ$ с помощью тиратронов, включенных в цепь поджигатель — катод (по схеме независимого поджигания). Поступление управляющих импульсов на вентили $V1—V3$ и, следовательно, зарядка C_p продолжают до тех пор, пока не сравняются напряжения, поступающие на пороговый элемент $БУ$ с делителя на резисторах $R2—R4$ и от специального источника. Аналогично осуществляется подзарядка C_p при понижении уровня U_c в результате тока утечки.

Регулировка уровня напряжения U_c в этом источнике осуществляется с помощью делителя $R2—R4$. После окончания зарядки при подаче команды на сварку срабатывает один из контакторов $K1$ или $K2$ и конденсаторы C_p разряжаются на первичную обмотку TpC .

Данный источник питания содержит также блок управления ключевым усилением, устройство управления автоматическим чередованием включения контакторов $K1$ и $K2$ (для изменения полярности импульсов сварочного тока с целью устранения подмагничивания сварочного трансформатора), которые здесь не рассматриваются.

Важной особенностью питания электрических устройств средней и большой мощности является преимущественное использование специальных электролитических конденсаторов. Поэтому во всех случаях для шунтирования напряжения обратной полярности параллельно первичной обмотке сварочного трансформатора TrC включают диод $V4$. Кроме того, после установки и подключения машины, при длительных перерывах в работе (10—20 дней) или при сварке на режимах с большей C_p необходимо выполнять в течение 1—5 ч тренировку (формовку) C_p . Она заключается в том, что уровень U_c повышается на конденсаторах от минимального до номинального постепенно. Если включение выпрямительного устройства на подзарядку происходит через 5—10 с, то формовку конденсаторов заканчивают.

Электрическое устройство серийной машины МТК-5001 (рис. 84, б) выполнено на новой элементной базе. Особенностью этого устройства является также отсутствие выпрямительного трансформатора. При подаче от блока управления БУ отпирающих импульсов в выпрямительное устройство тиристоры $V1$ и $V2$ поочередно открываются и конденсаторы C_p начинают заряжаться через омический токоограничитель $R1$ и диоды $V3$ и $V4$. Сигнал рассогласования, равный разности напряжения эталонного источника и напряжения, снимаемого с делителя $R2, R3$, пропорциональный уровню напряжения на C_{px} поступает на вход промежуточного усилителя, а затем на вход фазосдвигающих устройств БУ. Когда напряжение рассогласования достаточно велико [14] ($\Delta U > 1$ В), угол включения тиристоров $V1$ и $V2$ остается постоянным¹ (он выбирается из условий обеспечения зарядки C_p до заданного уровня U_c за время t_a [57]). При $\Delta U \leq 1$ В пропорционально напряжению рассогласования изменяется фаза импульсов на выходе фазосдвигающих устройств и, следовательно, угол включения тиристоров $V1$ и $V2$ в каждую полуволну выпрямленного напряжения возрастает, что обеспечивает малую погрешность стабилизации U_c (не более ± 1 %). При $\Delta U = 0$ прекращаются подача отпирающих импульсов на $V1$ и $V2$ и зарядка конденсаторов C_p .

Сварка деталей осуществляется при достижении на электродах заданного усилия F_a и включении тиристора $V5$ за счет разряда C_p на первичную обмотку TrC . Для устранения подмагничивания TrC используется тот же прием, что и в схеме, показанной на рис. 84, а. Диод $V6$ с резистором $R4$, подключенные параллельно первичной обмотке TrC , обеспечивают шунтирование напряжения обратной полярности.

3. Механические устройства

Основными системами усилия сжатия F_{ax} которые применяются в точечных и рельефных конденсаторных машинах (рис. 85), являются: грузовая (рис. 85, а), пружинная (рис. 85, б, в), электромагнитная (рис. 85, г), сильфонная (рис. 85, д) и пневматическая (рис. 85, е). Привод электродов осуществляется здесь пе-

¹ В электрических устройствах машин МТК-4001, МТК-5001, МТК-8001 этот угол управления зарядного устройства равен 67° [57].

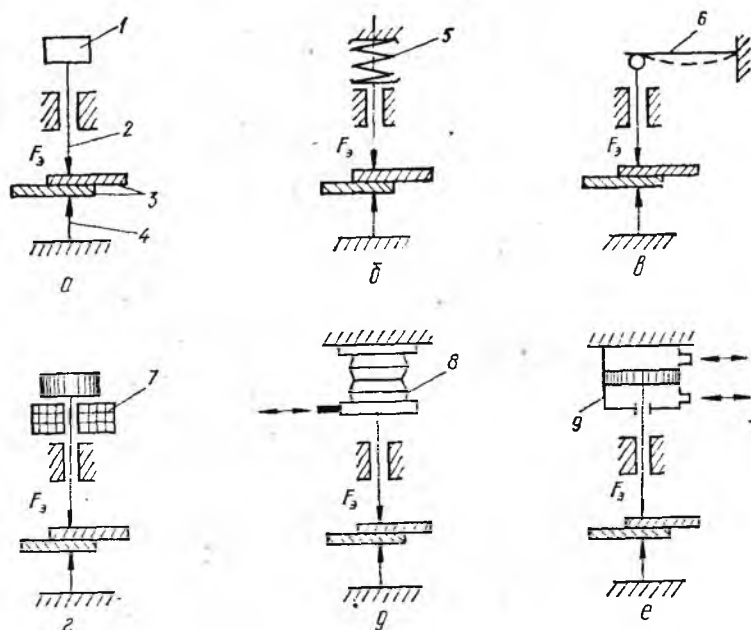


Рис. 85. Основные системы усилия сжатия F_g в точечных и рельефных конденсаторных машинах:

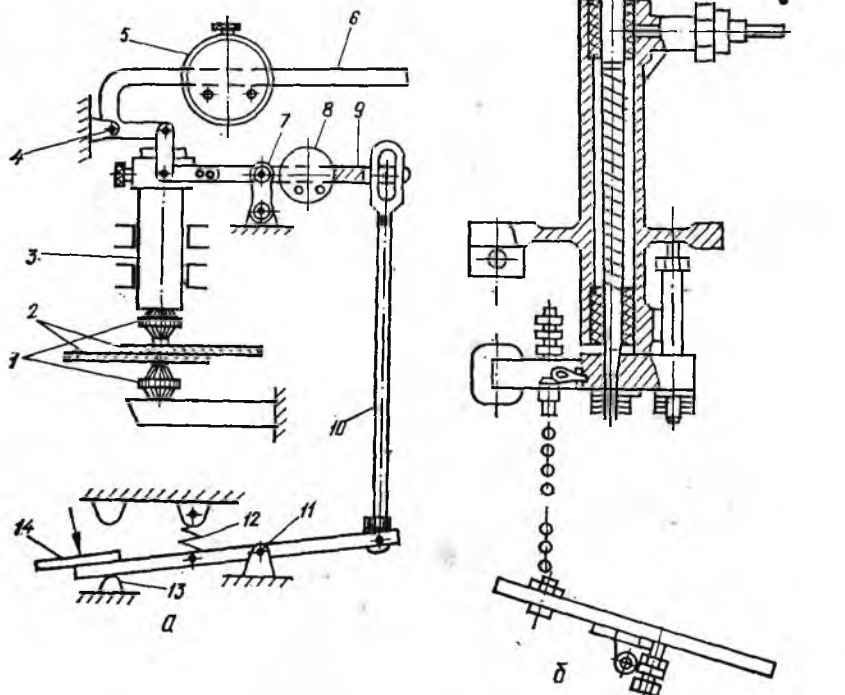
1 — груз; 2 — шток с верхним электродом; 3 — свариваемые детали; 4 — нижний электрод; 5 — цилиндрическая пружина; 6 — плоская пружина; 7 — электромагнит; 8 — сильфон; 9 — цилиндр с поршнем.

далю, а также электродвигательной, педально-пневматической, педально-электродвигательной, педально-электрогидравлической, пневматической и электромагнитной системами.

Механические устройства для микросварки в стационарных условиях. Наиболее простым, широко используемым в серийных конденсаторных машинах для точечной и рельефной микросварки листовых материалов является грузовой механизм сжатия [144, 145] с педальным приводом (рис. 86, а). При нажатии ногой на педаль 14 до упора 13 и соприкосновении электродов 1 со свариваемыми деталями 2 тяга 10 принимает положение, при которой рычаг 9 (за счет паза в верхней части тяги 10), поворачиваясь вокруг оси 7, освобождается от связи с педалью 14. В результате этого шток 3 с верхним электродом 1 под действием рычага 6 (который поворачивается в шарнире 4) с грузом 5 прижимает свариваемые детали 2 к нижнему электроду 1 с усилием, которое определяется массой сменного груза 5 и его положением на рычаге 6. После сварки деталей освобождается педаль 14, которая под действием пружины 12 проворачивается в шарнире 11 и система возвращается в исходное состояние. Масса собственно подвижной системы механизма (шток, электрододержатель и др.) при снятом грузе 5 уравнивается противовесом 8.

Недостатком грузового механизма сжатия является его большая инерционность (из-за значительной массы подвижной части), что не

Рис. 86. Кинематические схемы механизмов сжатия электродов с педальным приводом первых серийных конденсаторных машин:
 а — грузовой; б — пружинный (с плоской пружиной).



позволяет получать качественные микросварные соединения при сварке проволоки с листом, проволоки с проволокой и др., поскольку здесь требуются большие скорости перемещения электродов.

Небольшое распространение в серийных машинах малой мощности МТК получил пружинный механизм сжатия с педально-электромагнитным [135] приводом. В электромагнитных механизмах сжатия, которые сравнительно просты по устройству, сжатие деталей с необходимым по режиму сварки усилием производится электромагнитом, якорь которого связывают с механизмом перемещения одного из электродов. Усилие сжатия, развиваемое электромагнитом, регулируют изменением силы тока в его обмотке.

Электромагнитные механизмы сжатия и привода имеют ряд недостатков [142], основными из которых являются чувствительность к колебаниям напряжения в питающей их сети¹, обуславливающих

¹ Этот недостаток может быть устранен установкой в цепи питания электромагнитов или в целом электрических устройств машин стабилизаторов напряжения.

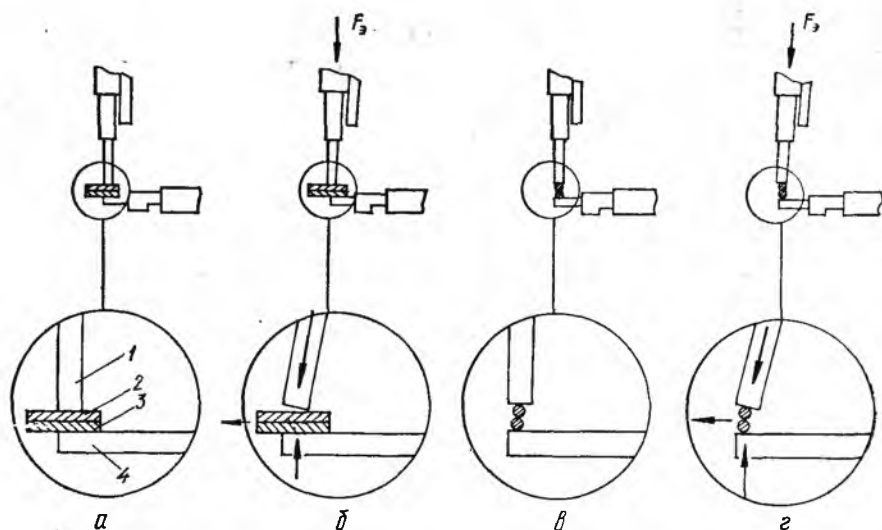


Рис. 87. Скольжение верхнего электрода в механизме сжатия, выполненном по схеме, приведенной на рис. 86, б (1, 4 — электроды; 2, 3 — свариваемые детали).

непостоянство усилия сжатия электродов; работа в ударном режиме вследствие быстрого втягивания якоря электромагнитов, что при сварке часто оказывается недопустимым (особенно для тонких деталей) и приводит к быстрой порче рабочих концов электродов, которые расклепываются и теряют форму.

В первых серийных машинах для контактной и в том числе конденсаторной микросварки, выпускавшихся электронной промышленностью, использовался пружинный механизм сжатия с педальным приводом (рис. 86, б). Здесь необходимое усилие сжатия электродов обеспечивается деформацией плоских рабочих пружин 1, жестко связанных с верхним подвижным электрододержателем 2. Этот механизм сжатия [217] хотя и имеет малую инерционность, но конструктивно выполнен так, что из-за жесткой привязки верхнего электрододержателя (с закрепленным в нем электродом) к плоским пружинам в процессе сжатия деталей нарушаются соосность и параллельность (рис. 87) рабочих частей электродов и их контактных поверхностей. Это происходит потому, что при изгибе пружин в процессе сжатия свариваемых деталей рабочая часть верхнего электрода перемещается по вертикали только до момента соприкосновения ее контактной поверхности с верхней деталью (рис. 87, а, в), а затем по достижении заданного усилия сжатия происходит сдвиг (скольжение) верхнего электрода в плоскости, проходящей через ось верхнего электрода и нижнего электрододержателя (рис. 87, б, г). Это не только вызывает нарушение режима сварки и брак по выплескам и пережогам (вследствие неравномерной плотности сварочного тока на площадке контактирования электрода с деталью и значительного его увеличения на отдельных участках), но часто обуславливает взаимное смещение

свариваемых деталей. Последнее недопустимо при выполнении прецизионной конденсаторной микросварки, когда требуется высокая точность взаимного положения свариваемых деталей, а к качеству и надежности получаемых соединений предъявляются очень высокие требования [148].

Следует отметить еще один важный недостаток этого механизма (см. рис. 86, б). По пружинам, концы которых обычно впаяны или запрессованы в верхний электрододержатель, в процессе сварочной операции пропускается ток $I_{\text{св}}$, что обуславливает нагрев этих пружин, изменение их механических свойств и увеличение сопротивлений переходных контактов пружины — электрододержатель (в случае их запрессовки в последний).

Кроме того, в рассмотренных механических устройствах для точечной и рельефной контактной микросварки электрический контур полностью совпадает с механическим, а поэтому возникающие при протекании сварочного тока электродинамические силы стремятся раздвинуть консоли машины и тем снижают усилие сжатия $F_{\text{э}}$ [97].

При этом максимальное снижение усилия на электродах, H , совпадает с максимумом сварочного тока $I_{\text{св max}}$ [97]:

$$\Delta F_{\text{э max}} = 2I_{\text{св max}}^2 \frac{l}{h} 10^{-8}, \quad (\text{VII.2})$$

где l и h — соответственно длина консолей машины и расстояние между ними, мм.

Механизмы сжатия электродов, которыми оснащаются машины для точечной контактной микросварки, разработанные и изготавливаемые ведущими фирмами капиталистических стран, также имеют ряд недостатков [148]. Так, фирмы «Спембли», «Херст» (Англия), «Минитьюбз» (Франция) [239] выпускают машины с механизмами сжатия электродов, которым присущи недостатки механизма, приведенного на рис. 86, б. Правда, для устранения скольжения верхнего электрода фирма «Минитьюбз» вводит регулировку угла наклона верхнего электрода к рабочей поверхности нижнего, что является трудоемкой операцией и, кроме того, не исключает указанного выше скольжения электрода в процессе сварки (в связи с изменением геометрических размеров деталей в зоне сварки). Для механизмов сжатия машин для точечной микросварки, выпускаемых фирмами «Велдматик», «Хьюз» (США), «Импульсфизик», «Пеко», «Мессер Грисхейм» (ФРГ), «Сиаци» (Франция), «Ориджин» (Япония) [239] характерна несколько повышенная инерционность за счет большой массы подвижной системы с верхним электродом.

При создании в Институте электросварки им. Е. О. Патона АН УССР новых механизмов сжатия для маломощных точечных машин были решены следующие важные задачи: обеспечена высокая стабильность усилия $F_{\text{э}}$, соосность и параллельность рабочих концов электродов (как в процессе сжатия деталей, так и при их сварке); существенно уменьшена инерционность подвижной системы; исключено влияние электродинамических сил на усилие $F_{\text{э}}$. В соответствии с этим в разработанных авторами механизмах сжатия [270—273]

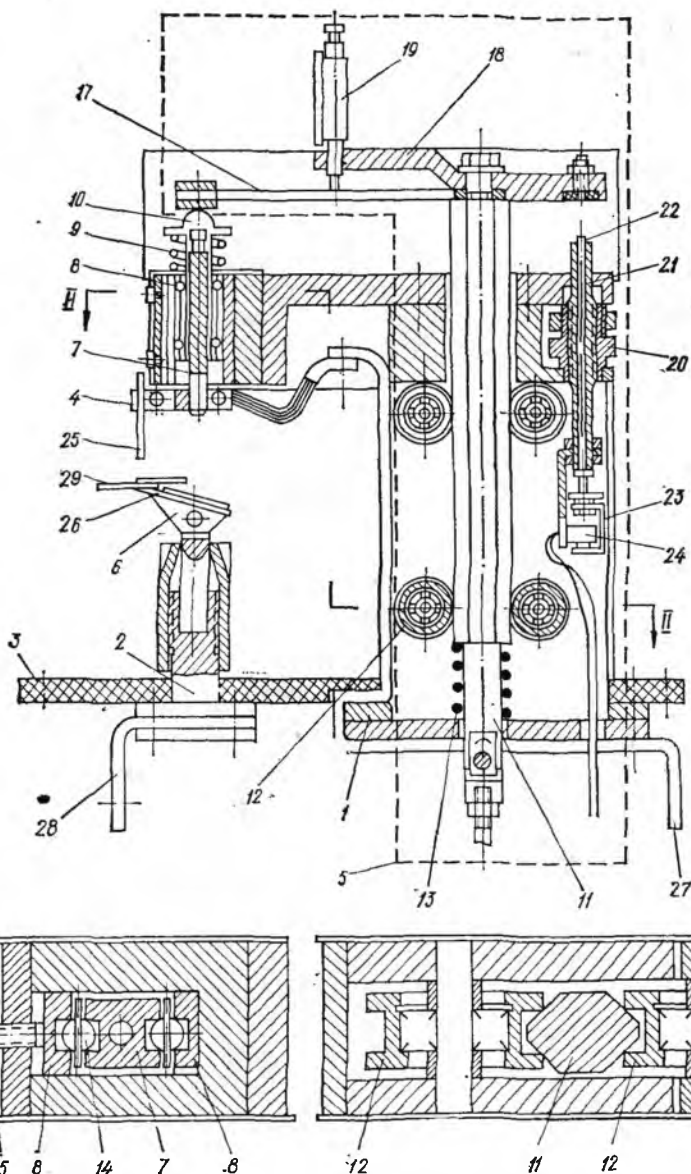


Рис. 88. Кинематическая схема пружинного механизма сжатия электродов с педальным приводом.

(рис. 88) подвижный шток, удерживающий верхний электрододержатель, перемещается в шариковых направляющих и не связан жестко с плоскими консольными пружинами, создающими усилие F_0 , а включение сварочного тока происходит только при достижении заданной величины этого усилия.

Для исключения действия электродинамических сил на усилие F_s токоподводящая шина к верхнему электрододержателю выполнена гибкой (из провода ПШС) и расположена перпендикулярно к корпусу нижнего электрододержателя. Кроме того, в одном из вариантов этого механизма сжатия в вертикальном направлении может перемещаться как верхний, так и нижний электрод. Это повышает чувствительность системы к процессам расширения и осадки металла в зоне сварки. Максимальное ускорение такой системы [27, 28]

$$a_{\max} = F_s \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right), \quad (\text{VII.3})$$

где m_1 и m_2 — массы подвижных систем соответственно верхнего и нижнего электродов. Данный механизм сжатия целесообразно использовать вместо механизма с одним подвижным электродом, если необходимо улучшить динамические свойства подвижной системы, а массу подвижных частей по конструктивным соображениям уменьшить нельзя.

Механизм сжатия для точечной и рельефной контактной микросварки (см. рис. 88) имеет корпус, состоящий из двух частей 1 и 2, прикрепленных к основанию 3, выполненному из электроизоляционного материала. В части 1 корпуса размещены верхний электрододержатель 4 и механизм 5, создающий усилие на электродах F_s , а в части 2 корпуса размещен нижний электрододержатель 6. Верхний электрододержатель 4 укреплен на штоке 7, перемещающемся в направляющих 8 с шариками (или роликами), установленными в части 1 корпуса. В верхней части штока 7 имеется цилиндрическая пружина 9, один конец которой упирается в корпус, а другой — в головку 10 штока 7.

Механизм 5 состоит из системы рычагов, связанных с ножным или механическим приводом (на рисунке не показан), и штока 11, перемещающегося в роликовых (шариковых) направляющих 12, смонтированных в часть 1 корпуса. В нижней части штока 11 имеется пружина 13, упирающаяся одним концом в выступ штока 11, а другим в основание корпуса.

Направляющие 8, например, с шариками 14 смонтированы в корпус так, что одна из них поджимается к штоку 7 и фиксируется винтами 15. Это необходимо для того, чтобы перемещение штока 7 в вертикальном направлении происходило без колебаний, смещений и проворотов. Для исключения аналогичных явлений при перемещении штока 11 направляющие 12 с одной стороны штока поджимаются винтами 16.

К верхней части штока 11 механизма 5 одним концом жестко прикреплены плоские пружины 17, а с другой их конец свободно опирается на головку 10 штока 7. В этой же части штока 11 укреплен кронштейн 18 с индикатором 19 усилия на электродах. Усилие сжатия электродов устанавливается гайкой 20, которая перемещает в вертикальном направлении винт 21. В последнем имеется отверстие, в которое установлен штифт 22, причем нижний его конец соприкасается через скобу 23 с кнопкой микровыключателя 24, связанного с источ-

ником питания устройства (на рисунке не показан), а верхний конец на 0,5—1,0 мм выступает из винта 21.

Нижний шток-электрододержатель 6 можно выполнить перемещающимся по направляющим с шариками или роликами в вертикальном направлении. При этом нижняя часть штока-электрододержателя 6 полукруглой головкой свободно опирается на плоские консольные пружины, жестко закрепленные одним концом к основанию.

Электроды 25, 26 укреплены соответственно в электрододержателях 4, 6, которые имеют возможность поворачиваться на любой угол относительно осей штока 7 и корпуса 2. От источника питания (на рисунке не показан) к электрододержателю 4 подведена токоподводящая шина 27, а к электрододержателю 6 — шина 28, причем гибкая часть шины 27 расположена перпендикулярно к электрододержателю 6.

Работа механизма сжатия (см. рис. 88) осуществляется следующим образом. В электрододержатели 4 и 6 устанавливаются соответствующие свариваемому изделию электроды 25 и 26. С помощью гайки 20, перемещающей винт 21 вверх или вниз, устанавливают требуемое в соответствии с технологией сварки усилие F_s , а на пульте источника питания — необходимые электрические параметры режима сварки. От ножного или механического привода шток 11 в роликовых направляющих 12 перемещается вниз до упора кронштейна 18 в винт 21. В это время плоские пружины 17 через полукруглую головку 10 перемещают шток 7 в направляющих 8 с шариками до упора электрода 25 в свариваемые детали 29, установленные на нижнем электроде 26. В процессе перемещения штока 7 цилиндрическая пружина 9 сжимается, а плоские пружины 17 прогибаются на величину, определяемую расстоянием между кронштейном 18 и винтом 21. Прогиб плоских пружин 17, соответствующий заданному по режиму сварки усилию F_s , контролируется индикатором 19. При полном упоре кронштейна 18 в винт 21 утапливается штифт 22, который через скобу 23 отжимает кнопку микровыключателя 24, в результате чего включается источник питания, обеспечивающий сварку деталей 29.

Если нижний электрододержатель 6 смонтирован перемещающимся в направляющих, то при приложении к свариваемым деталям 29 усилия сжатия F_s электрододержатель 6 опускается вниз и прогибает плоские пружины (на рис. не показаны). В этом случае в процессе сварки нижний электрод 26 имеет возможность перемещаться вверх и вниз при расширении и осадке металла зоны сварки. Регулируя жесткость пружины (изменением сечения и количества пружин в пакете), можно получать различные ускорения в зоне сварки.

После окончания сварки ножной или механический привод отключается и механизм сжатия возвращается в исходное состояние.

В рассмотренных выше механизмах сжатия смещение осей сварочных электродов (за счет использования шариковых направляющих) составляло не более $\pm 0,01$ мм, а погрешность усилия F_s на электродах — не более $\pm 1,5$ %. Испытания этих механизмов при сварке деталей различных толщин и сечений показали, что указанные отклонения не оказывают влияния на качество сварного соединения.

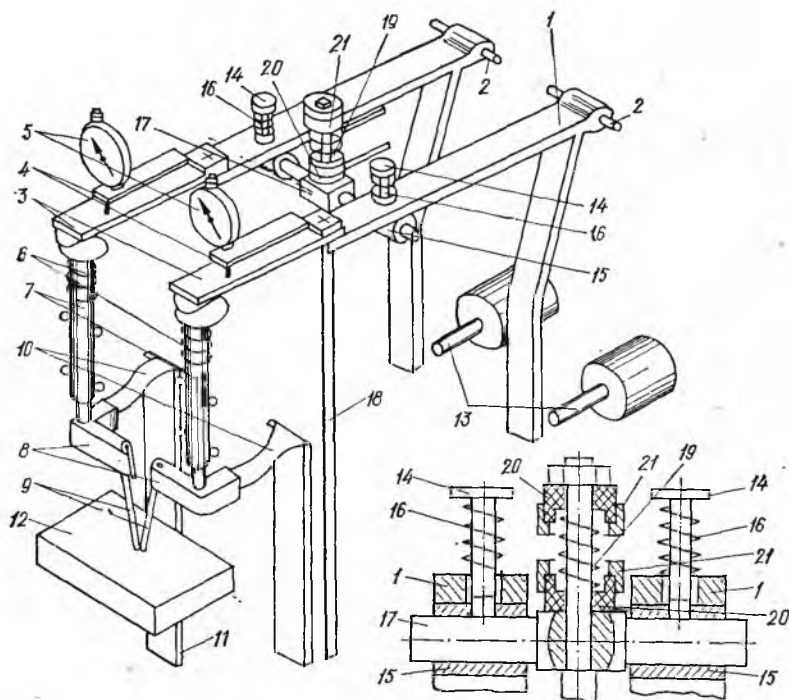


Рис. 89. Кинематическая схема пружинного механизма сжатия электродов с педальным приводом для двухточечной сварки.

Нежесткая связь штока, несущего верхний электрод, с плоскими пружинами давления позволила снизить до минимума массу m подвижной системы механизма (для механизмов сжатия с усилием F_a до 100 Н она составляет 0,05 кг). Расположение токоподводящей шины к верхнему электрододержателю перпендикулярно к корпусу нижнего электрододержателя позволило практически исключить влияние электродинамических сил на усилие F_a .

Рассмотренный механизм сжатия применен в машинах для точечной и рельефной конденсаторной микросварки ТКМ-14, К-535, ССП-3, ТКМ-15.

При разработке в ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР механических устройств для двухточечной или односторонней контактной микросварки с односторонним токоподводом, кроме удовлетворения указанных выше требований, решена задача обеспечения отдельного регулирования и контроля усилия сжатия на каждом электроде. Это обусловлено тем, что рабочие части электродов изнашиваются неравномерно, поэтому в случае зависимого регулирования усилия сжатия F_a на одном из электродов это усилие будет ниже заданного. Кроме того, при сварке с односторонним токоподводом часто необходимо обеспечить на каждом электроде разные по величине усилия F_a .

В пружинном механизме сжатия [234] с педальным приводом для двухточечной (или односторонней) контактной микросварки (рис. 89)

решение поставленной задачи достигается тем, что рычаги 1 выполнены Г-образными и установлены на соединяющей их оси 17, связанной с подпружиненной на конце приводной тягой 18 через подпружиненные втулки 15, снабженные пальцами 14 с буртом. При этом против свободного конца каждого рычага 1 на корпусе установлен упор 13, а другой конец каждого рычага снабжен плоской пружиной 3, взаимодействующей с вмонтированным в шариковых направляющих штоком 7. Этот механизм сжатия электродов работает следующим образом. Нажимая на педаль, перемещают приводную тягу 18 вниз, тем самым с помощью оси 17, втулок 15, пальцев 14, пружин 16 поворачивают оба рычага 1 в шарнирах 2. Эти рычаги концами плоских пружин 3 перемещают в шариковых направляющих штоки 7 с электрододержателями 8, сжимая пружины 6 до тех пор, пока электроды 9 не коснутся свариваемых деталей на рабочем столике 12. После этого происходит изгиб плоских пружин 3 до тех пор, пока вертикальное плечо рычага 1 не упрется в регулировочный винт-упор 13. Если один из рычагов 1 упрется раньше, то в отверстии на горизонтальном верхнем плече этого рычага, сжимая пружину 16, будет проскальзывать палец 14 с буртом. Дальнейшее перемещение приводной тяги 18 при упоре вертикальных нижних плеч обоих рычагов 1 в винты-упоры 13 обуславливает сжатие обеих пружин 16 и более жесткой (чем пружина 16) пружины 19. При этом контактные кольца 21, изолированные от корпуса механизма втулками 20, замыкают цепь управления и импульс сварочного тока проходит через сварочную обмотку сварочного трансформатора, шины 10, 11, электрододержатели 8, электроды 9 и 12, между которыми зажаты свариваемые детали. После выполнения сварки тяга 18 и весь механизм возвращаются в исходное положение.

Затем цикл может повторяться. Нужно отметить, что при этом усилие F_s на каждом электроде регулируется и строго фиксируется упором 13. Контроль усилия сжатия F_s осуществляется с помощью индикатора 5 часового типа, установленного в отверстии кронштейна 4.

Работа на машинах для точечной контактной микросварки с ножным приводом механизма сжатия при усилии $F_s > 200$ Н часто фи-

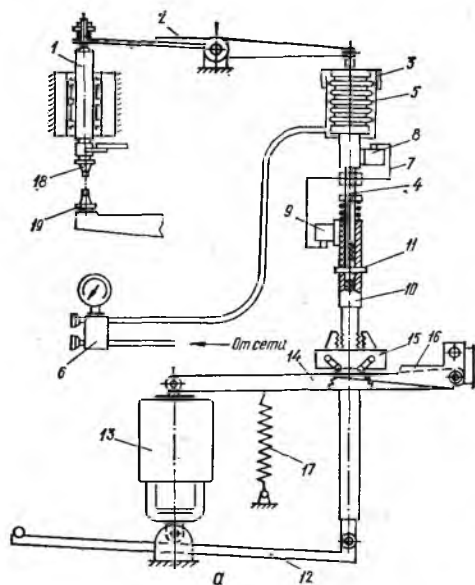
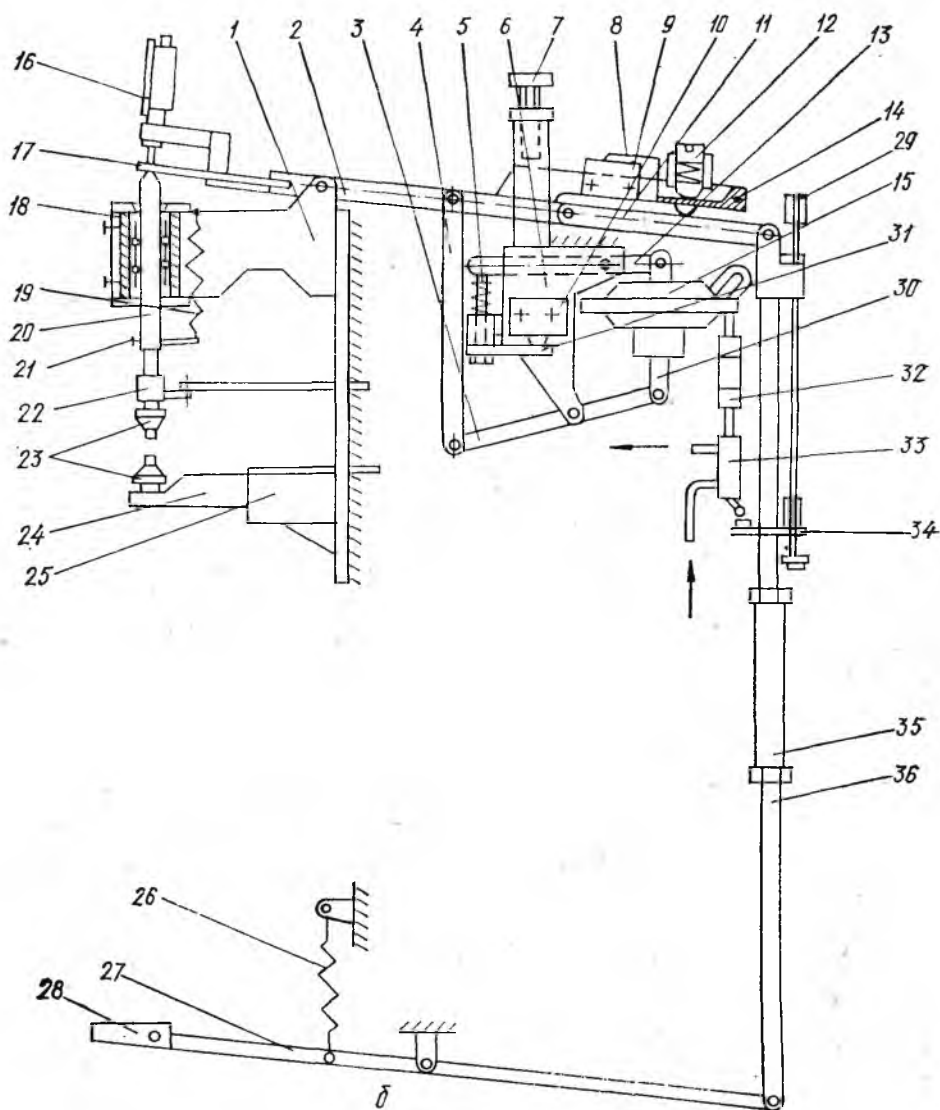


Рис. 90. Кинематические схемы пружинных механизмов сжатия электродов:

а — с педально-электрогидравлическим приводом; б — с педально-пневматическим приводом.



зически утомительна. Однако существующие механизмы сжатия с механическим приводом не позволяют управлять процессом сближения электродов и поправлять (при необходимости) взаимное расположение свариваемых деталей.

Для устранения указанных выше недостатков в ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР разработан пружинный механизм сжатия с педально-электрогидравлическим приводом [236]. Этот механизм (рис. 90, а) включает в себя шток 1 в шариковых направляющих, подпружиненный от двуплечего рычага 2, сидящего на оси в подшипниках. Дру-

той конец рычага шарнирно соединен со стаканом 3, нижняя часть которого посажена на шток 4 по ходовой посадке. Внутри стакана между штоком и верхней крышкой стакана помещен сильфон 5 (или регулируемая рабочая пружина), полость которого соединена гибкой трубкой с крановым регулировочным блоком 6 и манометром. На штоке 4 предусмотрена скоба 7, один конец которой упирается в кнопку переключателя 8, закрепленного на стакане, другой — в кнопку переключателя 9, закрепленного на тяге 10. Средняя часть тяги представляет зубчатую рейку.

Шток 4 посажен нижним концом по ходовой посадке через пружину в полости тяги 10, в которой штифт 11 ограничивает с помощью продольного отверстия-паза перемещение штока до нескольких миллиметров, достаточных для включения переключателя 9.

Нижний конец тяги 10 шарнирно соединен с посаженным на оси двуплечим рычагом 12, другой конец которого является педалью. На оси рычага установлен электрогидротолкатель 13, шток которого соединен шарнирно со станиной рычагом 14.

На тяге 10 посажена свободно охватывающая ее в месте зубчатой рейки специальная защелка 15, которая подпружинена от рычага 14 и упирается в неподвижно закрепленный на станине кронштейн 16, благодаря чему защелка находится в открытом состоянии, не сцепляясь с рейкой тяги.

Рычаг 14 соединен с пружиной 17, другой конец которой закреплен на станине. Под верхним электродом 18 установлен на кронштейне нижний электрод 19.

Работает устройство следующим образом. С помощью кранового блока 6 и воздуха от сети устанавливают требуемое давление в сильфоне 5, соответствующее заданному усилию сжатия (при работе с пружиной устанавливают предварительное сжатие пружины). После этого свариваемое изделие укладывают на нижний электрод 19, нажимают на педаль рычага 12 и через тягу 10 и рычаг 2 шток 1 с электродом 18 плавно опускается на свариваемое изделие, расположенное на электроде 19. При возникновении противодействующего усилия от соприкосновения электрода 18 с изделием шток 4 смещается в полости тяги 10 до упора в штифт 11. При этом кнопка переключателя 9 включает электрогидротолкатель 13.

Шток электрогидротолкателя 13, перемещаясь, поворачивает рычаг 14 и тем самым поднимает защелку 15, подпружиненные захваты которой отходят от кронштейна 14 и захватывают зубчатую рейку тяги 10. При дальнейшем перемещении штока 10 электрогидротолкатель 13 через рычаг 14, находящийся в зацеплении с зубчатой рейкой, передает через сжимающийся сильфон 5, рычаг 2 и шток 1 усилие на электроды 18, 19. При достижении заданного усилия в момент сжатия сильфона 5 на 2—3 мм включается переключатель 8 и происходит сварка.

После освобождения педали рычага 12 отключается электрогидротолкатель 13, пружина 17 вместе с тягой 10 возвращаются в исходное положение. Подпружиненные захваты защелки 15, наталкиваясь на кронштейн 16, разводятся, зубчатая рейка тяги 10 выходит из за-

цепления с захватами, тяга 10 свободно опускается, поднимая через шток 4, стакан 3 и рычаг 2 шток 1 с электродом 18.

Пружинный механизм сжатия электродов с педально-пневматическим приводом (рис. 90, б) конструктивно выполнен следующим образом [157].

В установленном на каркасе машины кронштейне 1 и в шариковых направляющих 18 размещен шток 20, который с помощью цилиндрической пружины 19 прижимается к плоской рабочей пружине 17, закрепленной на двуплечем рычаге 2, шарнирно установленном в кронштейне 1.

Над рабочей консольной пружиной 17 на конце рычага 2 закреплен индикатор 16, который измеряет прогиб пружины 17 при сжатии свариваемых деталей (величина прогиба пружины 17 определяет усилие сжатия электродов). В шток 20 установлен и зафиксирован винтом 21 шток с электрододержателем 22, к которому крепится шиноподвод от сварочного трансформатора (на рисунке не показан). Телескопическая конструкция штоков 20 и 22 позволяет регулировать раствор электродов.

Электрододержатель 24 с нижним электродом 23 установлен в кронштейне 25, который закреплен на плите кронштейна 1 и изолирован от него, а шиной-токоподводом соединен со сварочным трансформатором.

Тяга 4 шарнирно соединена с рычагом 2 и двуплечим рычагом 3. Рычаг 3 средней частью шарнирно установлен в закрепленном на каркасе машины кронштейне 6, а также шарнирно соединен со штоком 30 пневмокамеры 15. Пневмокамера шарнирно соединена с одним концом двуплечего рычага 13, который средней частью шарнирно установлен в кронштейне 6, а другим концом — прижат к верхней части (фланцу) кронштейна 6 с помощью подпружиненного штока 5. На штоке закреплена контактная пластина 31, воздействующая на кнопку переключателя 10, установленного на кронштейне 6. Рычаг 11, шарнирно соединенный с рычагом 2, тягой 36 и упирающийся в выступ подпружиненного рычага 14, имеет возможность свободно проворачиваться вниз с тягой 36, которая шарнирно соединена с двуплечим рычагом 27. Последний средней частью шарнирно установлен в каркасе машины и вместе с закрепленной на нем педалью 28 поджат вверх к каркасу пружиной 26. Длина тяги 36 регулируется стяжной спецгайкой 35.

На рычаге 14, установленном шарнирно на кронштейне двуплечего рычага 2, закреплены микропереключатель 9 и контактная пружина 8, которая воздействует на кнопку микропереключателя 9. Усилие поджатия рычага 14 с контактной пружиной 8 к кронштейну рычага 2 может регулироваться с помощью винта 12.

На тяге 36 в верхней части установлен регулировочный винт 29 с подпружиненной пластиной-упором 34, который воздействует на закрепленный на каркасе машины клапан 33, подающий воздух через дроссель 32 в пневмокамеру 15. Винт 29 предназначен для регулировки момента включения (относительно хода верхнего электрода) пневмоклапана 33.

Над рычагом 2 в скобе кронштейна 6 установлен регулировочный винт 7, ограничивающий поворот данного рычага и, следовательно, препятствующий увеличению усилия F_0 относительно заданной величины.

Работа механизма сжатия с ножным приводом (при $F_0 \leq 200$ Н) осуществляется следующим образом.

Предварительно разместив между электродами 23 свариваемые детали, нажимают на педаль 28 и с помощью винта 7 и контргайки, ограничивающих поворот рычага 2, устанавливают по индикатору 16 прогиб плоской рабочей пружины 17, соответствующий требуемому усилию сжатия. Прогиб пружины 17 определяют по переводным таблицам «Прогиб — усилие». При нажатии на педаль 28 рычаг 27 перемещает вверх тягу 36, которая поворачивает рычаг 11 вместе с рычагом 2. Пружина 17 при повороте рычага 2 перемещает вниз шток 20 в шариковых направляющих 18 до соприкосновения верхнего электрода 23 со свариваемыми деталями, расположенными на нижнем электроде 23. Дальнейшее перемещение вверх тяги 36 обеспечивает прогиб пружины 17 до тех пор, пока рычаг 2 не упрется в регулировочный винт 7. После этого рычаг 11 смещает рычаг 14 с пружиной 8 на величину, достаточную для отпускания кнопки переключателя 9. Последний срабатывает и дает команду на сварку. После прохождения импульса сварочного тока при отпусании педали шток 20 (под действием пружины 19) и все остальные подвижные элементы механизма сжатия (за счет пружины 26) возвращаются в исходное состояние и механизм готов к выполнению следующей сварочной операции. При работе с ножным приводом сжатия электродов переключатель 10 не функционирует.

Работа механизма сжатия с пневматическим приводом осуществляется следующим образом. Предварительно разместив между электродами 23 свариваемые детали, нажимают на педаль 28 и с помощью регулировочного винта 29 устанавливают пластину-упор 34 на таком расстоянии от рукоятки включения пневмоклапана 33, при котором соприкосновение электродов 23 со свариваемыми деталями происходит до включения пневмоклапана 33 и поступления воздуха в пневмокамеру 15. Ориентировочно пневмоклапан должен включаться при усилии на электродах не менее 10—20 Н (регистрируется по индикатору 16). Затем (при включенном пневмоклапане 33) с помощью винта 7 и контргайки, ограничивающих поворот рычага 2, устанавливают по индикатору 16 величину прогиба плоской рабочей пружины 17, соответствующую требуемому усилию.

Процесс сварки деталей выполняется следующим образом. При нажатии на педаль 28 тяга 36 поворачивает рычаги 11, 2 вокруг шарнира в кронштейне 1, пружина 17 перемещает шток 20 в шариковых направляющих 18 до соприкосновения электродов 23 со свариваемым изделием. В этот момент, когда тяга 36 переместилась вверх и пластина-упор 34 (на регулировочном винте 29) нажала на рукоятку включения пневмоклапана 33, последний включается и подает воздух через дроссель 32 в пневмокамеру 15. При этом перемещающийся шток 30 пневмокамеры 15 толкает рычаг 3, который через тягу 4 дожимает

рычаг 2 до упора в регулировочный винт 7. Когда поворот рычага 2 приостановится, пневмокамера 15 толкает рычаг 13, который отжимает подпружиненный шток 5 с контактной пластиной 31. Эта пластина отпускает кнопку переключателя 10, в результате чего дается команда на сварку. После прохождения импульса сварочного тока и отпускания педали 28 тяга 36 перемещается вниз, рычаг 11 проворачивается (относительно шарнира, связывающего его с рычагом 2), контактная пластина 34 отпускает рукоятку пневмоклапана 33,

прекращается подача воздуха, пневмокамера 15 сообщается с атмосферой и шток 30 возвращается в первоначальное положение. При этом рычаги 2, 11, 27, тяга 36 под действием пружины 26, а шток 20 под действием пружины 19 возвращаются в исходное положение. Механизм готов к выполнению следующей сварочной операции. Кинематическая схема пружинного механизма сжатия с педально-электродвигательным приводом приведена в работе [146].

Описанные выше механизмы сжатия (см. рис. 89, 90) были использованы при разработке как универсальных машин для точечной и рельефной контактной конденсаторной микросварки, так и автоматического оборудования, в частности, для точечной микросварки соединителя с катодом миниатюрных электровакуумных приборов [83]. Работу его поясним по упрощенной схеме (рис. 91). Из вибробункера 8 ориентированные керны попадают в накопитель 9, откуда поштучно выдаются в гнезда (позиция I) периодически поворачивающегося барабана 6. В следующей после загрузки позиции II керн принудительно досылается на оправку-электрод 7 с помощью толкателя 5. В позиции III к керну подводится плющенко (механизм подачи и резки плющенко не показан) и при вращении вала с кулачком 16 рычаг 13 под действием пружины 15 перемещается влево и давит на шток 3 с электродом (роликом) 4. Шток 3 перемещается в роликовых направляющих до соприкосновения электрода 4 с деталями, уложенными

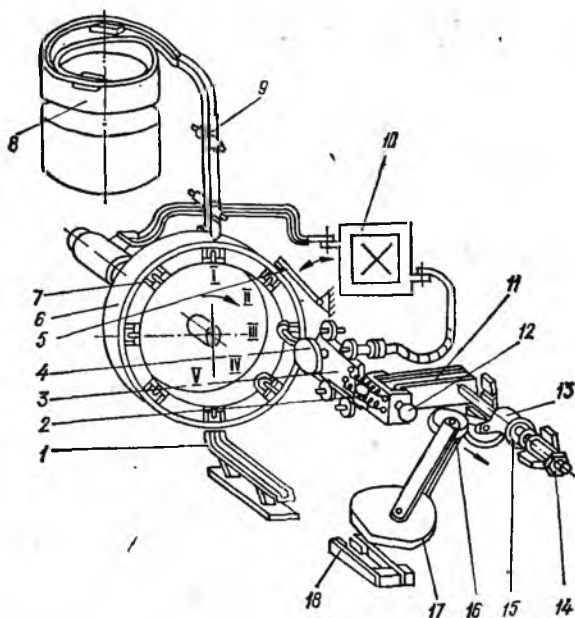


Рис. 91. Упрощенная кинематическая схема автомата для точечной конденсаторной микросварки соединителя с катодом электровакуумных приборов.

на электроде 7. Дальнейшим перемещением рычага 13 усилие от плоских пружин 11 передается на электроды 4 и 7. При этом кулачок 17 включает контакты 18, которые приводят в действие электрическую схему источника питания, и происходит сварка. В нижней позиции V сваренный катод снимается с оправки и попадает на приемный лоток вибрационной линейки 1. В случае, если керн на оправке нет, срабатывает блокировка и сварочный импульс не подается, а рабочие поверхности электродов предохраняются от повреждения.

Загрузка керн в гнезда барабана происходит под действием собственной массы и импульса сжатого воздуха. Принудительное перемещение кернов в накопителе обусловлено незначительной массой деталей. Усилие на электродах (2—50 Н) регулируется винтом 12 и гайкой 14.

Таким образом, рассмотренные выше механизмы сжатия электродов (рис. 88—91) обеспечивают высокую стабильность и контроль статического усилия сжатия (погрешность усилия F_0 не превышает $\pm 1,5\%$), а также включение сварочного тока только при достижении установленного значения F_0 ; параллельность контактных поверхностей рабочих частей электродов в результате нежесткой связи штока, удерживающего сварочный электрод, с плоскими пружинами, создающими усилие F_0 ; соосность рабочих концов электродов, минимальную и постоянную силы трения в опорах вертикального перемещения штока со сварочным электродом благодаря использованию опор качения на стандартных шариках (смещение осей электродов составляет не более $\pm 0,01$ мм); малую инерционность механизма сжатия в результате значительного снижения массы штока со сварочным электродом и передачи усилия F_0 от рабочей пружины непосредственно на этот шток; полное предотвращение влияния в процессе сварки электродинамических сил на усилие F_0 благодаря расположению гибкой токоведущей шины к верхнему электрододержателю перпендикулярно к корпусу нижнего электрододержателя.

Механические устройства для микросварки в монтажных условиях. В связи с трудностью доступа электродов к местам сварки в ряде случаев используют малогабаритные механизмы сжатия, вмонтированные в ручные инструменты (пистолет, карандаш, пинцет, клещи) [137, 142, 164, 231—233].

В настоящее время на ряде предприятий все еще эксплуатируется ручной сварочный инструмент, основным недостатком которого является сжатие свариваемых деталей нестабильным усилием руки сварщика. Неизбежные при этом колебания F_0 обуславливают брак микросварных соединений (по прожогам, выплескам и непроварам).

Одна из конструкций разработанного в ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР пружинного механизма сжатия с ручным приводом показана на рис. 92. В корпусе 12 шарнирно на оси 4 установлен рычаг 6, на одном конце которого закреплен с помощью спецгайки 3 электрододержатель 2 с электродом 1, а на другом — плоская консольная пружина 9 и гибкий медный токоподводящий кабель 8. Для устранения поперечных перемещений рычаг 6 при сжатии сваривает

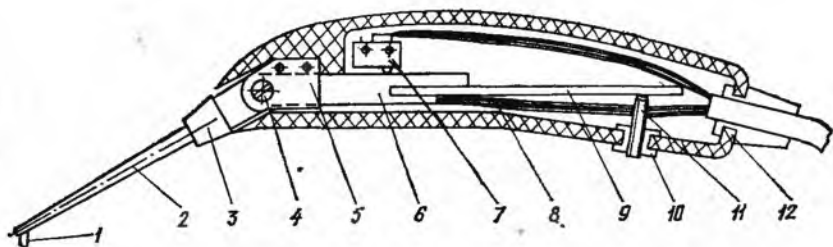


Рис. 92. Кинематическая схема пружинного механизма сжатия электродов с ручным приводом для сварки в монтажных условиях (карандаш).

мых деталей перемещается в направляющей скобе 5. Регулировка усилия сжатия F_0 осуществляется за счет перемещения винта 11 в спецгайке 10. Для подачи сигнала на сварку при достижении установленного усилия F_0 в корпусе 12 закреплен микровыключатель 7. Сварка деталей с помощью этого инструмента осуществляется следующим образом. При нажатии электродом 1 на свариваемые детали и достижении заданного усилия F_0 рычаг 6 с электрододержателем 2 поворачивается вокруг оси 4 на некоторый угол. При этом срабатывает кнопка микровыключателя 7, включается сварочный ток и происходит сварка деталей в одной точке.

Для точечной контактной односторонней микросварки деталей в монтажных условиях разработан двухэлектродный карандаш. Он содержит два изолированных друг от друга рычага с электрододержателями и консольными пружинами давления. Усилие на каждом электроде регулируется винтом. Принципиально этот ручной инструмент почти не отличается от одноэлектродного карандаша (см. рис. 92). Нами разработаны и другие конструкции механизмов сжатия для сварки в монтажных условиях [26], которые здесь подробно не рассматриваются.

Следует отметить, что использование в указанных выше конструкциях плоской рабочей пружины давления (вместо цилиндрической) позволило уменьшить габариты инструмента. Это, безусловно, важно для предприятий, где сварочные операции выполняют женщины.

В ряде случаев сварку деталей в труднодоступных местах удобно выполнять с помощью малогабаритных ручных клещей. Сконструированный в ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР пружинный механизм сжатия с ручным приводом, разработанный нами для малогабаритных клещей, приведен на рис. 93. В корпусе 14 закреплена неподвижная губка 15 с электродом 16 и гибкой токоподводящей шиной 9. Над неподвижной губкой на оси-шарнире 3 установлена подвижная губка 2 с электродом 1, на которой консольно закреплены плоская рабочая пружина 5, возвратная пружина 4 и гибкая токоподводящая шина 8. На оси-шарнире 3 независимо от подвижной губки 2 посажен рычаг 13 с клавишей 12. В последней размещен регулировочный винт 11, позволяющий устанавливать необходимое усилие сжатия F_0 , и закреплена контактная пружина 10. Внутри корпуса 14 жестко уста-

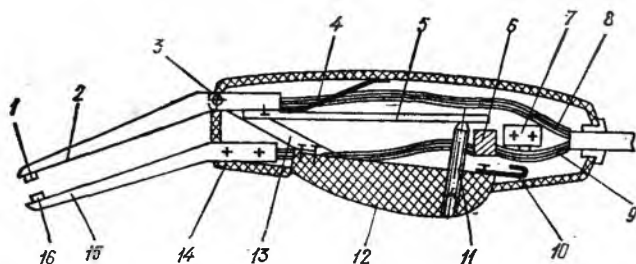


Рис. 93. Кинематические схемы пружинного механизма сжатия с ручным приводом для сварки в монтажных условиях (клещи).

новлены микропереключатель 7 и упор 6. Сварка деталей осуществляется следующим образом. Сжимая клавишу 12, с помощью пружины 5 и винта 11 поворачивают установленную на оси-шарнире 3 подвижную губку 2 до соприкосновения электрода 1 со свариваемыми деталями, расположенными на электроде 16. После этого винт 11 прогибает рабочую пружину 5 до тех пор, пока клавиша 12 не достигнет упора 6. При этом с помощью контактной пружины 10 включается микропереключатель 7 и происходит сварка. При отпускании рукоятки с помощью возвратной пружины 4 механизм сжатия возвращается в исходное состояние.

Исследование стабильности статического усилия F_s в разработанном нами малогабаритном ручном инструменте показало, что отклонения усилия F_s от установленного составляют не более $\pm 2\%$.

При точечной и рельефной конденсаторной сварке в монтажных условиях с $F_s > 50 \div 60$ Н используют пружинные механизмы сжатия с пневматическим приводом [137, 142].

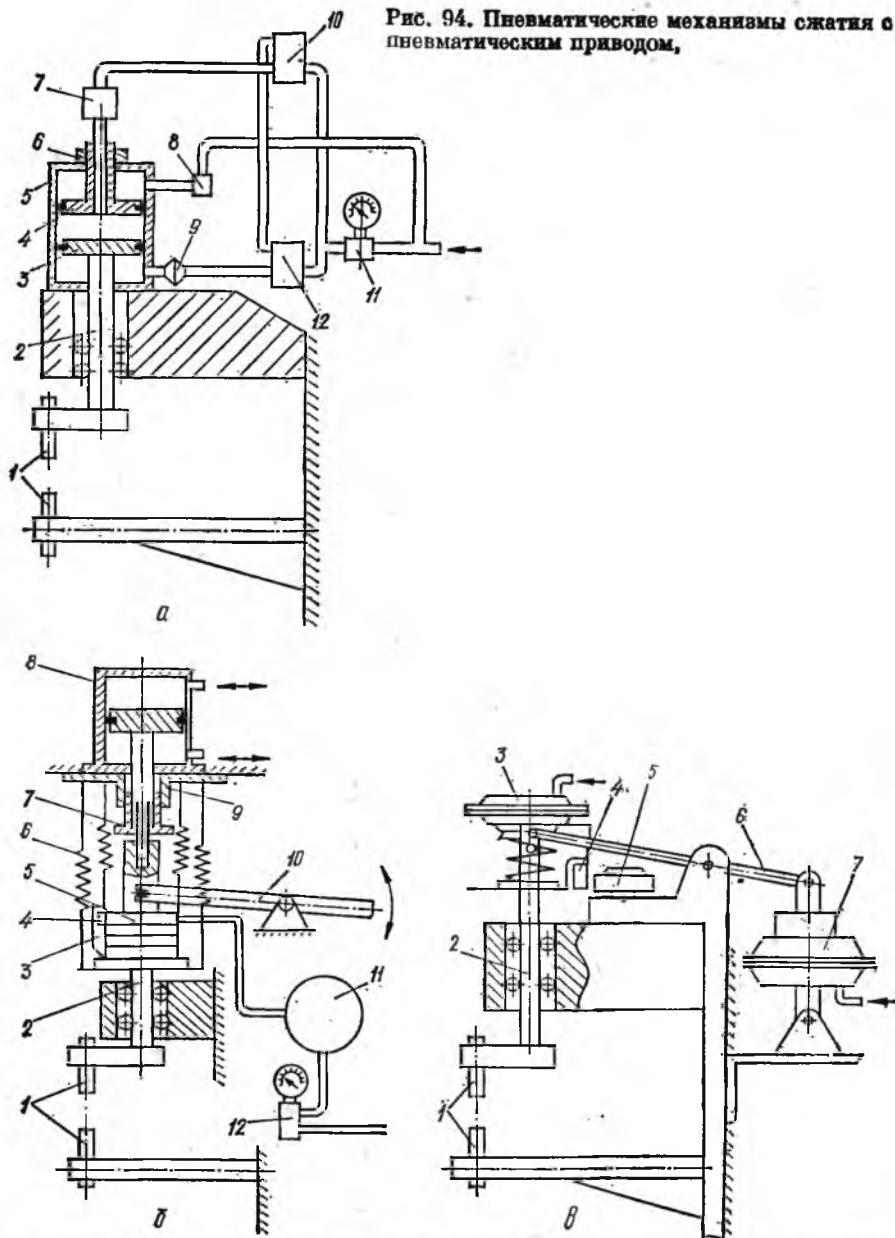
Механические устройства для сварки металлов толщиной 0,8—3,0 мм. Наибольшее распространение для точечной и рельефной конденсаторной сварки металлов толщиной более 0,8 мм получили пневматические механизмы сжатия электродов с пневматическим приводом (рис. 94).

Оригинальным узлом пневматического поршневого механизма (рис. 94, а) является трехкамерный цилиндр 5 с двумя поршнями 3 и 4.

В исходном состоянии верхняя камера цилиндра 5 через трехходовой кран 8 заполнена воздухом с сетевым давлением, а нижняя — воздухом с давлением, заданным редуктором 11. При включении электропневматического клапана 10 воздух с рабочим давлением через дроссель 7 поступает в среднюю камеру цилиндра 5 и перемещает поршень 3, который опускает шток 2 с верхним электродом 1, обеспечивая сжатие свариваемых деталей с усилием F_s . Величина усилия F_s зависит от давления в средней и нижней камерах цилиндра 5 (чем больше давление в нижней камере, тем меньше усилие F_s).

Для обеспечения проковки свариваемых деталей при включенном клапане 10 включается клапан 12, что обеспечивает выход воздуха из нижней камеры через клапан 9. После выполнения сварочной операции для перемещения вверх штока 2 с верхним электродом

Рис. 94. Пневматические механизмы сжатия с пневматическим приводом,



на установленную величину рабочего хода (определяется расстоянием между поршнями 3 и 4 и регулируется гайкой 6) выключается клапан 10 и включается клапан 12. Дополнительный ход вверх штока 2 с верхним электродом обеспечивается при соединении верхней камеры с атмосферой (через кран 8).

Следует отметить, что рассмотренный механизм отличается существенным разбросом усилия F_0 (до $\pm 20\%$).

Отличительной особенностью пневматических механизмов сжатия с пневматическим приводом, приведенных на рис. 94, б, в, по сравнению с описанным механизмом (см. рис. 94, а) является развязка привода от системы, передающей усилие F_0 на электроды. Так, введение в последнюю элемента регулируемой жесткости обеспечивает малую инерционность подвижной системы (шток с верхним электродом) механизма и стабилизацию усилия F_0 . Один из таких механизмов сжатия [235] (рис. 94, б) работает следующим образом. С помощью кранового блока 12 от пневмосети устанавливают требуемое давление в сильфоне 5 (элемент регулируемой жесткости), соответствующее заданному усилию сжатия F_0 .

При перемещении вверх правого плеча рычага 10 (например, с помощью педальной или пневматической системы) сильфонный узел 5, шток 2 с электродом 1 перемещаются вниз до упора электрода 1 в свариваемые детали, уложенные на нижнем электроде 1. При этом включается силовой цилиндр 8, шток которого, скользя, а затем упираясь в дно отверстия в ступице сильфонного узла 5, сжимает его на заданную величину, определяемую положением гайки 7 в корпусе 9. При этом с помощью контактной пластины 3 срабатывает датчик давления 4, который дает команду на сварку. При отсутствии воздействия на рычаг 10 механизм возвращается в исходное состояние. Следует отметить, что усилие сжатия, передаваемое здесь на электроды сильфонным узлом 5 с помощью ресивера 11 и ограничения хода гайкой 7 штока цилиндра 8, остается строго заданным при конкретной сварочной операции. Пружины 6 служат для уравнивания подвижной части механизма (сильфонного узла 5 и штока 2 с электродом).

Другой механизм сжатия этого класса — диафрагменно-пневматический (рис. 94, в). Здесь с помощью кранового блока (на рисунке не показан) от пневмосети устанавливают требуемое давление в пневмокамере 3, соответствующее заданному усилию сжатия F_0 . При подаче сжатого воздуха в пневмокамеру 7 рычаг 6 перемещает пневмокамеру 3, шток 2 с верхним электродом 1 до соприкосновения со свариваемыми деталями, уложенными на нижнем электроде 1. При дальнейшем перемещении и касании рычагом 6 упора 5 прогибается диафрагма пневмокамеры 3, шток 2 перемещается относительно корпуса пневмокамеры 3 на 2—3 мм и срабатывает переключатель 4, дающий команду на сварку. При возвращении привода в исходное состояние механизм сжатия готов к выполнению следующей сварочной операции.

Исследование технологических и эксплуатационных характеристик приведенных здесь механизмов сжатия электродов показало существенные преимущества механизмов вертикального перемещения подвижного электрода на опорах качения с элементом регулируемой жесткости в системе, создающей усилие F_0 на электродах (погрешность усилия не превышает $\pm(3-5)\%$). Использование поршневых механизмов сжатия с большой массой подвижной части (осо-

бенно на опорах скольжения) из-за нестабильности усилия (при сжатии свариваемых деталей и в процессе прохождения сварочного тока) приводит к снижению качества и повышению брака сварных соединений.

4. Основные характеристики оборудования

Основные разработки в области оборудования для точечной и рельефной конденсаторной сварки выполнены [14, 85, 86, 101—107, 114, 116, 118, 139, 144—147, 149—152, 154—161, 167]: ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР (все машины типов ТКМ, ТКБ и КО, также машины К-705, К-718, МТК-501, МТК-2001, ССП-3¹, ССП-5, СС-7, ССПИ-1 и электрические устройства машин типа МС²), Всесоюзным научно-исследовательским институтом электросварочного оборудования (ВНИИЭСО) (машины типа МТК, за исключением указанных выше, и типа МРК), МВТУ им. Н. Э. Баумана (машины типа К-7, К-22, К-23, К-32 и некоторые другие) и Рижским политехническим институтом (специализированные машины).

Конденсаторные машины малой мощности типов ТКМ (за исключением ТКМ-14), МТК и ТКБ для сварки в стационарных условиях конструктивно оформлены (рис. 95, а, б) в виде металлического шкафа с небольшим рабочим столиком. Внутри шкафа смонтировано электрическое устройство, а на верхней передней стенке шкафа — механизм сжатия электродов. Конденсаторные машины типов ТКМ-14 (рис. 95, в), ССП и ССПИ представляют собой стол с пылезащитной камерой³. На столе размещен механизм сжатия электродов (машины типа ССП) или клеммы для подключения кабеля ручного сварочного инструмента, являющегося составной частью машины (типа ССПИ), а под столешницей — электрическое устройство для точечной и рельефной микросварки. Машины типа К-705, МТК-501 и МС отличаются конструктивно от указанных выше стационарных машин типа ССП отсутствием пылезащитной камеры. В машинах К-718 и КО-107, предназначенных для микросварки в монтажных условиях, в отличие от машин типа ССПИ также нет стола с пылезащитной камерой.

Машины серии К⁴, разработанные МВТУ им. Н. Э. Баумана, серийно не выпускались, поэтому здесь не рассматриваются.

Основные характеристики серийного универсального оборудования для точечной и рельефной конденсаторной микросварки приведены в табл. 33, а выпускаемого мелкими сериями — в табл. 34.

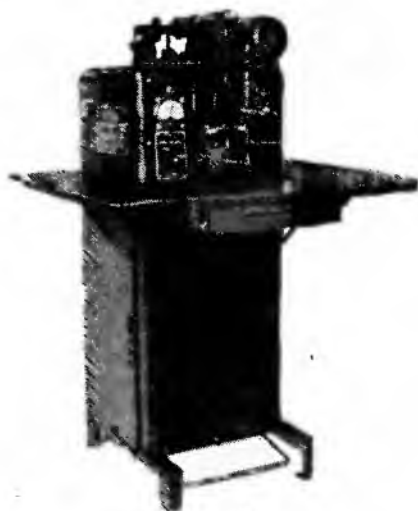
Оборудование, разработанное в последнее время, обеспечивает следующие термические циклы: подогрев — сварка (ТКМ-15,

¹ В серийных машинах типов ССП и ССПИ стол с пылезащитной камерой разработан Ужгородским машиностроительным заводом.

² В разработке электрических устройств принимало участие одно из производственно-технических объединений республики.

³ Степень очистки воздуха рабочей зоны — не более 5 пылинок размером 0,8 мкм на один литр подаваемого воздуха.

⁴ Они предназначены для сварки изделий электронной техники.



а



б

ТКМ-17, ССПИ-1, МС-1, МС-3, К-718 и КО-107); подогрев — пауза — сварка (ТКМ-14, ССП-3 и МТК-1601); подогрев — сварка и подогрев — пауза — сварка (ССП-5, К-705 и МТК-501); подогрев — сварка, подогрев — сварка — термообработка, сварка — термообработка и др. (МТК-2001). Все остальные машины осуществляют нагрев деталей только одним импульсом разрядного тока конденсаторов, причем в бестрансформаторной машине ТКБ-1 этот ток про-

Таблица 33. Основные характеристики серийного универсального оборудования

Показатель	ТКМ-7	ТКМ-8	ТКМ-14, ССП-3
Толщина свариваемого металла, мм:			
минимальная	0,02	0,05	0,01
максимальная	0,7	0,5	0,2
Диаметр свариваемого металла, мм:			
минимальный	—	—	0,02
максимальный	1,5	1,2	1,0
Номинальный сварочный ток, кА	—	—	—
Пределы регулирования усилия сжатия, даН	1—56	6—40	0,1—7,0
Максимальная производительность сварок/ч	1200	7000	7200
Вылет электродов, мм	150	150	90
Рабочий ход верхнего электрода, мм	15	15	15
Максимальная накопленная энергия, Дж	144	78	60
Пределы регулирования напряжения зарядки конденсаторов, В	1000	1000	150—400
Пределы регулирования емкости конденсаторов, мкФ	5—295	5—155	50—750
Механизм сжатия электродов	Грузовой	Пружинный	Пружинный

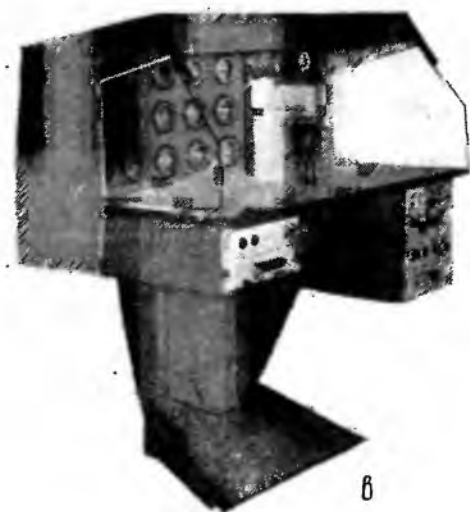


Рис. 95. Машины ТКМ-8 (а), ТКМ-17 (б) и ТКМ-14 (в) для точечной и рельефной конденсаторной микросварки.

ходит непосредственно через свариваемые детали. Машины ТКМ-8, МТК-1201, МТК-1601 и МТК-2001 могут работать в автоматическом режиме.

Кроме указанного в табл. 33 и 34 диапазона толщин (диаметров) свариваемых металлов на конденсаторных машинах малой мощности можно сваривать штифты, шпильки, контакты, шарики с другими деталями, а также детали толщиной до 0,15—0,5 мм¹ с деталями практически неограниченной толщины.

Сварка деталей на машинах ССПИ-1, К-718 (рис. 96) и КО-107 осуществляется в монтажных условиях с помощью ручного сварочного инструмента (пистолет, клещи, карандаш, пинцет и др.) на расстоянии до 2—3 м от электрического устройства.

¹ Эта толщина определяется максимальной толщиной свариваемого металла и всегда несколько ниже последней.

для точечной и рельефной конденсаторной микросварки

ТКМ-15	ТКМ-17	МТК-1201	МТК-1601	ССПИ-5	ССПИ-1
0,05 0,7	0,05 0,7	0,05 0,5	0,1 0,8	0,05 0,5	0,02 0,3
0,2 1,5 16 1—60	0,2 1,5 16 1—80	— — 12 3—63	— — 16 3—63	0,2 1,5 — 2—50	0,1 1,2 — 0,1—5,0
6000	6000	7200	7200	6000	4800
150 15	150 15	150 5	200 5	150 25	— —
600	600	240	400	1200	225
120—1000	120—1000	100—500	100—500	150—1000	180—800
100—1200	100—1200	320—1920	640—3200	100—1200	100—800
Пружин- ный	Пружин- ный	Пневмати- ческий	Пневмати- ческий	Пружинный	Пружинный

Показатель	ТКМ-7	ТКМ-8	ТКМ-14, ССП-3
Привод механизма сжатия	Педальный	Электродвигательный	Педальный
Напряжение питающей сети переменного тока частотой 50 Гц, В	220	220; 380	380
Потребляемая мощность, кВт·А	0,2	0,3	0,8
Габариты, мм	1400×800×700	1285×800×675	1025×880× ×1290
Масса, кг	190	220	195

Таблица 34. Основные характеристики мелкосерийного оборудования для точеч

Показатель	К-705	МТК-501	МТК-2001
Толщина свариваемого металла, мм:			
минимальная	0,02	0,01	0,1
максимальная	0,3	0,2	1,0
Диаметр свариваемого металла, мм:			
минимальный	0,2	0,02	0,4
максимальный	1,5	1,0	2,0
Номинальный сварочный ток, кА	—	5	20
Пределы регулирования усилия сжатия, даН	0,5—10	0,5—10	8—90
Максимальная производительность сварок/ч	3600	3600	4200
Вылет электродов, мм	100	90	200
Рабочий ход верхнего электрода, мм	10	20	20
Максимальная накопленная энергия, Дж:			
при подогреве	600	29	—
при сварке	600	100	800
Пределы регулирования напряжения зарядки конденсаторов, В:			
при подогреве	150—1000	100—350	—
при сварке	150—1000	200—500	200—1000
Пределы регулирования емкости конденсаторов, мкФ:			
при подогреве	100—1200	160—480	—
при сварке	100—1200	160—800	200—1600
Механизм сжатия электродов	Пружинный	Пружинный	Пневматический
Привод механизма сжатия	Педальный	Педальный	То же
Потребляемая мощность, кВт·А	1,2	0,4	2,0
Габариты, мм	1300×1060× ×850	1300×1100× ×1000	1400×800×800
Масса, кг	350	190	390

Примечание. Напряжение питающей сети переменного тока частотой 50 Гц — 220 В.

ТКМ-15	ТКМ-17	МТК-1201	МТК-1801	ССП-5	ССПИ-1
Педалный	Педалный и педаль- но-пневма- тический	Пневмати- ческий	Пневмати- ческий	Педално- электрогидрав- лический	Ручной
220	220	220	380	380	380
0,8	0,8	0,3	2,0	1,0	0,8
1285×800× ×685 200	1350×770× ×700 220	1300× ×1000×730 200	1000×900× ×1350 400	1600×1000× ×1180 300	1290×1025× ×800 195

ной и рельефной конденсаторной микросварки

ТКБ-1	МС-1, МС-3	К-718	КО-107
0,02 0,4	0,05 0,5	0,02 0,25	0,02 0,3
0,2 1,0	— —	0,2 0,8	0,2 0,8
—	—	—	3,5
1—30	2—40	0,5—7,0	0,1—4,0
3600 150	3600 —	3600 —	3600 —
15	6	—	—
—	—	—	—
105	200	600	600
—	—	—	—
100	200—950	120—1000	120—1000
—	—	—	—
21 000 Грузовой Педалный 0,2	50—650 Пружинный Педалный 0,5	100—1200 Пружинный Ручной 0,8	100—1200 Пружинный Ручной 0,8
1250×560×700	1490×1000×700	1440×690×650	925×600×480
80	170	150	150

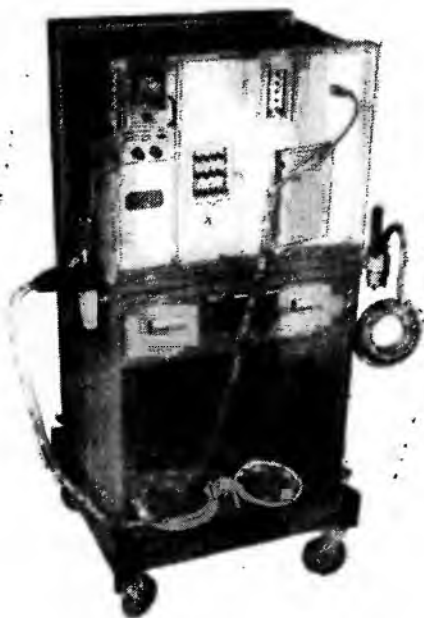


Рис. 96. Машина К-718 для точечной и рельефной конденсаторной микросварки в монтажных условиях.

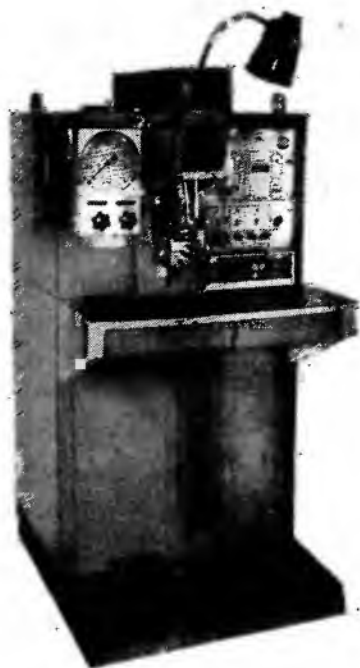


Рис. 97. Машина МТК-2001 для точечной и рельефной контактной сварки.

Все рассмотренные здесь машины имеют универсальное назначение [212].

Вместе с тем опыт внедрения конденсаторной микросварки показывает, что применительно к конкретным сварным узлам универсальные маломощные машины легко модернизируются в специализированные (благодаря небольшой доработке привода механизма сжатия, созданию специальной оснастки, обеспечивающей в ряде случаев и подачу деталей в рабочую зону). Это позволяет оперативно и эффективно (при малых затратах) внедрять технологические процессы конденсаторной микросварки при модернизации и производстве новых изделий. Наконец, при большой серийности сварных узлов наиболее целесообразны разработка и внедрение специализированных полуавтоматов и автоматов, например, для сварки керна катода с соединителем сверхминиатюрных и миниатюрных радиоламп, контактов с держателями, шариков к перьям авторучек, узлов точного приборостроения¹, изделий радиоэлектроники и др.

В настоящее время серийный выпуск конденсаторных машин малой мощности организован на Киевском опытно-экспериментальном заводе средств автоматического управления (КОЭЗ САУ) —

¹ Ряд работ в этом направлении выполнены Рижским политехническим институтом [208—210].

Таблица 35. Основные характеристики серийного универсального оборудования для точечной и рельефной конденсаторной сварки

Показатель	МТК-75	МТК-6301	МТК-6001	МТК-8004
Толщина свариваемого металла, мм:				
минимальная	0,3	0,3	0,3	0,3
максимальная (для алюминиевых сплавов)	2,5	2,0	1,5	2,0
Номинальный сварочный ток, кА	80	63	50	80
Пределы регулирования усилия сжатия, даН:				
сварочное	250—1400	160—970	150—800	150—2500
ковочное	До 2000	До 2180	До 1750	До 5000
Максимальная производительность, сварок/ч	1800	1800	1800	2400
Вылет электродов, мм	1500	1200	600	1500
Раствор электродов, мм	500	300	300	500
Ход верхнего электрода, мм:				
рабочий	30	20	20	20
дополнительный	300	200	100	180
Максимальная накопленная энергия, кДж	22	13,3	8,4	25,2
Пределы регулирования напряжения зарядки конденсаторов, В	300—400	200—400	200—400	200—400
Максимальная емкость конденсаторов, мкФ	274 000	166 600	105 000	315 000
Напряжение питающей сети переменного тока частотой 50 Гц, В	380	380	380	380
Потребляемая мощность, кВт·А	75	40	20	70
Габариты, мм:				
машины	3190×1260× ×3820	910×2730× ×2550	2460×1850× ×1000	1250×1320× ×1860
шкафа управления	—	770×600×1860	1200×350×600	800×500× ×1848
шкафа с конденсаторами	—	1300×410× ×2100	1600×600×800	1350×800× ×1848

Показатель	МТК-75	МТК-6301	МТК-5001	МТК-8004
Масса, кг:				
машины	6500	4500	2700	1750
шкафа управ-	—	260	122	200
шкафа с кон-	—	650	310	700
денсаторами				

Примечание. Для всех типов оборудования механизм сжатия электродов и его привод пневматические.

типов ТКМ-15 и ТКМ-17, Ужгородском машиностроительном заводе — типа ССП-3, одном из производственно-технических объединений республики — типов МС. К серийному выпуску на Калининград-

Таблица 36. Основные характеристики серийного оборудования для рельефной

Показатель	МТК-5-3	МТК-8002
Периметр герметизируемых корпусов (при суммарной толщине свариваемых деталей 0,3—1,2 мм), мм	10—38	30—80
Номинальный сварочный ток, кА	32	80
Пределы регулирования усилия сжатия, даН	40—400	150—1250
Производительность, сварок/ч	1200	900
Максимальная накопленная энергия, кДж	2,74	14,8
Пределы регулирования напряжения зарядки конденсаторов, В	150—400	200—400
Максимальная емкость конденсаторов, мкФ	34 300	184 800
Коэффициент трансформации сварочного трансформатора	44; 88	22; 48
Габариты, мм:		
машины	1260×1030×1760	1250×1320×1860
станции управления	700×600×1820	800×500×1848
шкафа с конденсаторами	—	1350×800×1848
Масса, кг:		
машины	750	1750
станции управления	300	200
шкафа с конденсаторами	—	700

Примечание. Для всех видов оборудования механизм сжатия электродов и его при

ском заводе «Электросварка» подготовлены машины типов МТК-2001 (рис. 97) и МТК-501.

Универсальное серийное оборудование (табл. 35) большой мощности (кроме машины МТК-75, которая выполнена в однокорпусном исполнении) размещено в трех шкафах: в первом — механическое устройство и сварочный трансформатор, во втором — блоки управления, а в третьем — электролитические конденсаторы (рис. 98). Аналогичную конструкцию имеют специализированные машины для рельефной сварки корпусов электронных приборов (табл. 36) МТК-8002, МТК-16001, МРК-10001, МРК-10002, МРК-16001, МРК-16002, МРК-16003. Машины МТК-5-3, МРК-4001 и МРК-4002 размещены в двух шкафах: в первом — механическое устройство и сварочный трансформатор, во втором — блоки управления и конденсаторов.

На универсальных серийных машинах большой мощности выполняется в основном точечная и рельефная сварка крупногабаритных конструкций из коррозионно-стойких сталей, алюминиевых, титановых

конденсаторной сварки корпусов полупроводниковых приборов и интегральных схем

МТК-16001	МРК-4001, МРК-4002	МРК-10001, МРК-10002	МРК-16001, МРК-16002, 16003
60—125	22—55	55—100	100—150
160 300—3000	40 100—500	100 200—1250	160 400—2000 (МРК-16001, МРК-16002) 700—4000 (МРК-16003) 900 (МРК-16001, МРК-16003) 500 (МРК-16002) 32,0
720	1800 (МРК-4001)	1200 (МРК-10001)	900 (МРК-16001, МРК-16003) 500 (МРК-16002) 32,0
44,0	900 (МРК-4002) 3,6	600 (МРК-10002) 16,1	500 (МРК-16002) 32,0
200—400	150—400	150—400	150—400
550 000	44 800	202 000	404 000
21; 42	—	—	—
1250×2800×2320 770×600×1780 1310×810×1738	1170×1905×1650 800×700×1850 —	2100×1210×1960 800×700×1850 1800×1100×600	2355×1240×2450 1800×1100×600 1800×1100×600
5400 200 800	2200 400 —	2900 350 600	5500 350 600

вод пневматические, напряжение питающей сети переменного тока частотой 50 Гц — 380 В.

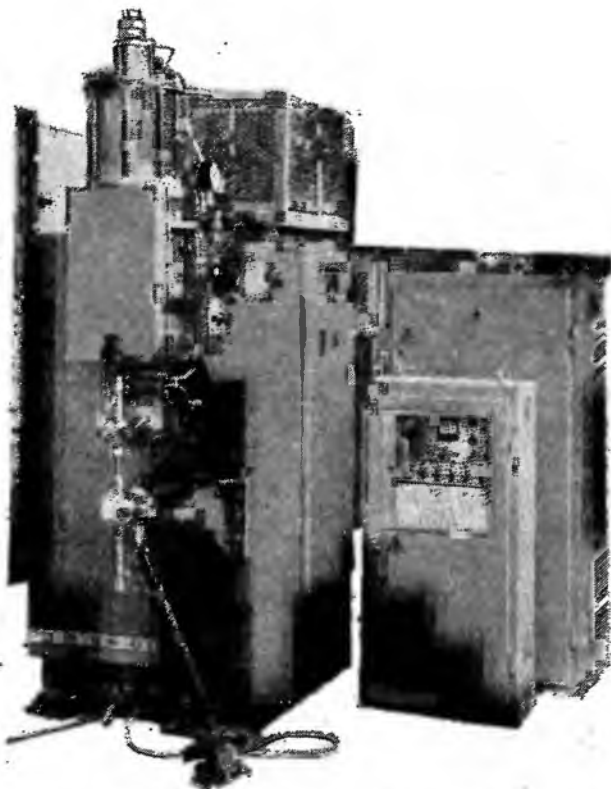


Рис. 98. Машина МТК-5001 для точечной конденсаторной сварки.

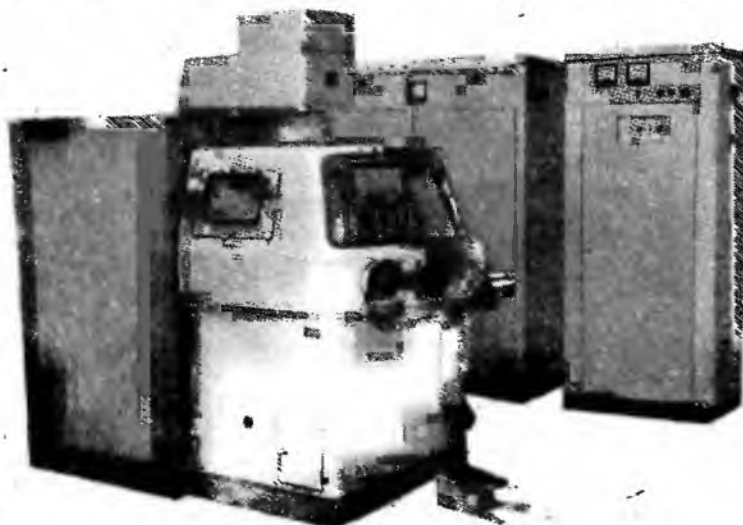


Рис. 99. Машина МРК-10001 для рельефной конденсаторной сварки.

и других сплавов. Специализированные серийные машины благодаря размещению рабочей зоны в герметичном скафандре выполняют сварку деталей в защитной контролируемой среде (рис. 99). Для повышения производительности машины МРК-4001, МРК-10001, МРК-16001 и МРК-16003 в отличие от машин МРК-4002, МРК-10002 и МРК-16002 оснащены 12 электродными устройствами, размещенными на поворотном столе с шаговым перемещением, и устройством для съема сваренных деталей (установка деталей между электродами выполняется вручную).

Кроме рассмотренных выше серийных конденсаторных машин большой мощности во ВНИИЭСО были разработаны и внедрены в производство специализированные машины для рельефной сварки контактов диаметром до 10 мм с держателями (тип МТК-8001), штуцеров и фланцев диаметром до 43 мм с горловинами топливных баков. В ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР при участии Таллинского завода им Пегельмана — машины для контурной рельефной сварки корпусов тиристоров. Во ВНИИ подшипниковой промышленности созданы несколько типов машин для рельефной сварки сепараторов шарикоподшипников. Все эти машины изготовлены не более чем в нескольких экземплярах по индивидуальным заказам.

Разработкой и выпуском универсальных и специализированных машин для точечной и рельефной конденсаторной сварки занимается также ряд указанных выше зарубежных фирм.

Разработанные в СССР маломощные конденсаторные машины выполнены на уровне лучших образцов зарубежных фирм и в ряде случаев их превосходят, например: по использованию комбинированных термических циклов нагрева деталей, малоинерционным механизмам сжатия электродов, простоте конструкций механических и электрических устройств и др.

ГЛАВА VIII

ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ТОЧЕЧНОЙ И РЕЛЬЕФНОЙ КОНДЕНСАТОРНОЙ СВАРКИ

1. Выбор рабочей батареи конденсаторов

Батарея электрических конденсаторов является важнейшим узлом конденсаторных машин и служит для накопления практически постоянных и регулируемых по конкретному режиму сварки количеств электрической энергии [29], предназначенных и расходуемых на сварочные операции.

Если известны энергия W_k и емкость C_p , необходимые для сварки, то напряжение зарядки рассчитывается по формуле

$$U_c = \sqrt{\frac{2W_k}{C_p}}. \quad (\text{VIII.1})$$

Величина U_c при проектировании конденсаторных машин выбирается с учетом требований техники безопасности и таких основных положений: для стационарных и переносных машин напряжение зарядки, как правило, не следует принимать большим 1000 В при трансформаторной конденсаторной сварке сопротивлением и 100 В для бестрансформаторной сварки сопротивлением; с увеличением напряжения зарядки конденсаторов обычно наблюдается уменьшение удельных показателей (по объему и массе), отнесенных к 1 Дж накопленной в конденсаторах энергии, однако при этом увеличивается опасность работы на машинах и требуются дополнительные устройства и затраты по технике безопасности.

К конденсаторам для сварочных машин предъявляются следующие основные требования: надежность в работе при режиме зарядки — полный разряд с частотой 30—200 циклов/мин, сохранение практически постоянного значения номинальной емкости при длительной эксплуатации и хранении; возможно меньшие удельные показатели; относительная недефицитность.

Кроме того, при выборе типа конденсаторов для сварки необходимо принимать во внимание еще такие положения: для стационарных машин, где габариты и масса батареи конденсаторов не имеют решающего значения, выбранный тип конденсаторов должен быть максимально надежным в эксплуатации и дешевым; для переносных машин, где важно иметь минимальные габариты и массу батареи конденсаторов, выбранный тип конденсаторов должен отвечать этим требованиям, а также быть достаточно надежным в эксплуатации

и дешевым; в выбранном типе конденсаторов рабочее напряжение должно быть не меньше расчетного напряжения зарядки батареи конденсаторов, а его емкость (в одном корпусе) — как можно большей, поскольку при этом его удельные показатели практически всегда получаются наименьшими [137, 142].

За последние годы широким опытом внедрения в СССР конденсаторной сварки металлов малых толщин установлено, что для длительной эксплуатации наиболее целесообразно применять бумажные и металлобумажные конденсаторы [204].

Что касается конденсаторных машин средней и большой мощности, то для накопления энергии W_k , исчисляемой несколькими единицами и даже 20—30 кДж, наиболее предпочтительны электролитические конденсаторы, применение которых позволяет существенно уменьшить габариты машин и получать довольно большие значения $t_{св}$ (так как здесь в связи с малыми U_c величина C_p весьма значительна).

Емкость батареи конденсатора можно выбирать по формуле

$$C_p = \frac{2W_k}{U_c^2}. \quad (\text{VIII.2})$$

Количество энергии W_k , которое необходимо накопить в конденсаторной батарее проектируемой сварочной машины, должно определяться следующим образом:

1. Если машина рассчитывается на сварку металла одной марки и в диапазоне его толщин $\delta_{\min} - \delta_{\max}$, то значение W_k необходимо определять по максимальной толщине $\delta_{\max}$.

Расчет W_k в зависимости от толщины и теплофизических свойств свариваемого металла, КПД сварочного контура и диаметра контактной поверхности электрода выполняется по формуле

$$W_k \approx 3,27 \frac{d_o^2}{\eta_{с.к}} 2\delta_{\max} \gamma c T_{пл}, \quad (\text{VIII.3})$$

где γ — плотность свариваемого металла, г/см³; c — его удельная теплоемкость, кал/г · °С; $T_{пл}$ — температура плавления металла, °С; $\eta_{с.к}$ — коэффициент полезного действия сварочного контура машины; 3,27 — коэффициент, учитывающий перевод калорий в джоули (0,24) и то, что вместо площади контактной поверхности электрода указан квадрат его диаметра ($0,785 : 0,24 = 3,27$).

Необходимо указать, что формула (VIII.3) была впервые выведена в работе [141] для точечной конденсаторной микросварки при допущении, что столбик металла сжатых между электродами двух деталей толщиной δ имеет диаметр, равный d_o . Однако она может быть применена и для менее точных (ориентировочных) расчетов при толщине свариваемого металла более 0,5 мм. В этой формуле вместо КПД сварочной машины $\eta_{с.м}$ принят такой же коэффициент для сварочного контура $\eta_{с.к}$, поскольку сама она дает несколько приближенное значение W_k , а потери энергии вне сварочного контура довольно незначительны и для данного расчета можно вполне при-
нять, что $\eta_{с.м} \approx \eta_{с.к}$.

2. При необходимости проектировать точечную конденсаторную машину для сварки металлов нескольких марок и в диапазоне их толщин $\delta_{\min} - \delta_{\max}$ энергия W_k должна рассчитываться по формуле (VIII.3) на максимальную толщину $\delta_{\max}$ той марки металла, у которого входящее в нее произведение $\gamma c T_{\text{пл}}$ является наибольшим.

3. Если конденсаторная машина (например, специализированная) проектируется на точечную сварку между собой двух разнородных марок металла толщиной δ , то энергию W'_k в данном случае следует рассчитывать по формуле

$$W'_k \approx 3,27 \frac{d_0^2 \delta}{\eta_{\text{сн}}} (\gamma_1 c_1 T_{\text{пл1}} + \gamma_2 c_2 T_{\text{пл2}}), \quad (\text{VIII.4})$$

где $\gamma_1 c_1 T_{\text{пл1}}$ и $\gamma_2 c_2 T_{\text{пл2}}$ — соответственно указанные в формуле (VIII.3) характеристики каждого из двух свариваемых металлов.

4. После определения энергии W_k (или W'_k) необходимо исходя в первую очередь из технологических требований определить, как в проектируемой машине будет регулироваться энергия W_k .

В универсальных машинах для точечной и рельефной трансформаторной конденсаторной сварки сопротивлением энергию W_k , как правило, регулируют, изменяя емкость C_p и напряжение U_c . При регулировании формы кривой сварочного тока изменением напряжения зарядки конденсаторов от $U_{c \min}$ до $U_{c \max}$ емкость батареи конденсаторов следует выбирать из условия неизменности полного (расчетного) значения W_k для данной конденсаторной машины, что можно выразить равенством

$$W_k = \frac{C_{p \max} U_{c \min}^2}{2} = \frac{C_{p \min} U_{c \max}^2}{2}, \quad (\text{VIII.5})$$

где $C_{p \max}$ — максимальная (расчетная) емкость батареи конденсаторов при минимальном значении напряжения ее зарядки; $C_{p \min}$ — минимальная емкость батареи конденсаторов при максимальном значении напряжения ее зарядки.

Из выражения (VIII.5) можно вывести расчетную емкость батареи конденсаторов

$$C_p = C_{p \max} = C_{p \min} \left(\frac{U_{c \max}}{U_{c \min}} \right)^2. \quad (\text{VIII.6})$$

Последняя формула показывает, что если, например, взять отношение $U_{c \max}/U_{c \min}$ равным 2—3, то расчетное значение емкости C_p должно быть увеличено против $C_{p \min}$ в 4—9 раз по сравнению со случаем, если бы конденсаторная машина проектировалась только на напряжение $U_{c \max}$. Поэтому в конденсаторных машинах регулирование напряжения зарядки конденсаторов является экономически невыгодным, так как при этом для сохранения неизменности значения энергии W_k приходится значительно увеличивать емкость и габариты батарей конденсаторов, а также монтировать в них конденсаторы на рабочее напряжение, равное $U_{c \max}$. Однако такое регулирование следует применять, когда без него нельзя получить необходимые формы кривых сварочного тока.

2. Особенности расчета сварочного трансформатора

Исходными величинами для расчета сварочного трансформатора конденсаторной машины любой мощности являются расчетное значение аккумулированной в конденсаторах энергии W_k , необходимой для сварки заданной толщины (сечения) и марки металла; сопротивление R_2 и индуктивность L_2 вторичной цепи машины [56] (включая трансформатор и зону сварки).

Расчет сварочного трансформатора для конденсаторной сварки [23, 56, 65, 66, 82, 137, 138, 142, 187, 194] сходен с расчетом такого трансформатора для обычных контактных машин [211], но имеет следующие особенности: незначительное время разряда конденсатора вызывает малый нагрев обмоток трансформатора, поэтому, как правило, они не требуют специального охлаждения (по этой же причине в трансформаторе потери в меди и стали обычно составляют практически ничтожную величину); необходимость регулирования при подборе режимов сварки емкости конденсаторов, напряжения их зарядки и коэффициента трансформации сварочного трансформатора обуславливает протекание по его первичной обмотке разных по величине и продолжительности импульсов разрядного тока конденсаторов, что вносит некоторую неопределенность в расчет сечений железного сердечника и обмоток трансформатора.

При разряде конденсаторов на первичную обмотку сварочного трансформатора по его обмоткам протекают колебательные или аperiodические токи. Импульсный характер разрядных токов вызывает необходимость расчета сварочного трансформатора на их наибольшее значение из всех возможных при регулировании различных параметров режима конденсаторной сварки.

Расчет магнитного потока $\Phi_{\max}$, по которому должно выбирать сечение сердечника сварочного трансформатора машины для точечной или рельефной сварки, следовало бы производить с учетом остаточного магнитного потока Φ_0 в этом сердечнике, обусловленного тем, что в таких машинах сварочный ток как правило униполярный, а поэтому при каждом разряде конденсаторов образуется поток Φ_0 .

Практически компенсация действия остаточного потока может быть осуществлена одним из следующих способов [137, 142]:

1. В сердечнике сварочного трансформатора TrC (рис. 100, а) делается воздушный зазор $l_{жн}$. Этот способ наиболее прост и применяется в конденсаторных машинах небольшой мощности.

2. Сварочный трансформатор выполняется с дополнительной обмоткой II (рис. 100, б), по которой после разряда конденсаторов на сварку (положение 1 перекидного ключа $ПК$) пропускается (положение 2 этого ключа) от отдельного источника питания постоянный размагничивающий ток $i_{пр}$. Величину и направление этого тока устанавливают так, чтобы он создавал магнитный поток смещения, равный по величине и противоположный по знаку остаточному потоку Φ_0 (при разных режимах сварки можно регулировать величину $i_{пр}$ и получать соответствующие значения потока смещения). В не-

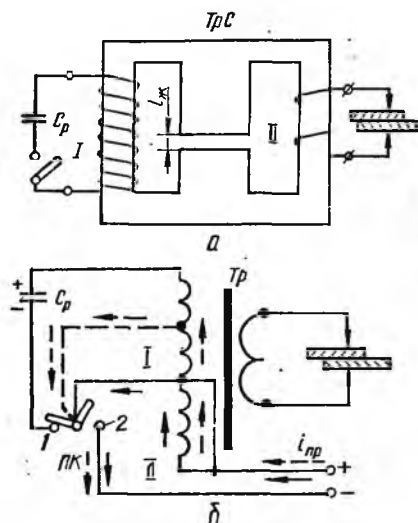


Рис. 100. Принципиальные схемы способов уменьшения (компенсации) остаточного магнитного потока Φ_0 , возникающего при протекании (в одном и том же направлении) разрядного тока конденсаторов через первичную обмотку сварочного трансформатора.

размагничивающего тока $i_{пр}$ используется часть витков первичной обмотки I . При этом размагничивающий ток проходит по нижней части обмотки (замкнутый контур для этого тока создается перемычками, показанными штриховыми линиями). Такой способ удобен конструктивно, так как не требует дополнительной обмотки.

3. В первичной обмотке сварочного трансформатора реверсируется разрядный ток конденсатора, что выполняется по разным схемам [137].

Наиболее просто реверсировать ток механическим переключателем РП (рис. 101, а); левому его положению соответствует направление тока в первичной обмотке трансформатора, показанное сплошными, а правому — штриховыми стрелками. Как видно из рис. 101, а, эти направления противоположны и, следовательно, при каждом из чередующихся один за другим разрядами конденсатора C_p получается различный знак остаточного потока Φ_0 , действие которого нейтрализуется основным потоком противоположного знака, создаваемым при очередном разряде конденсатора. Такое же действие реверсирования разрядного тока имеет место и при включении в его цепь двух тиристоров, как показано на рис. 101, б. Однако здесь очередное включение тиристоров происходит в зависимости от полярности на конденсаторе C_p , периодическое изменение которой производится с помощью не показанного на рис. 101, б блока. Такая схема реверсирования разрядного тока в первичной обмотке свароч-

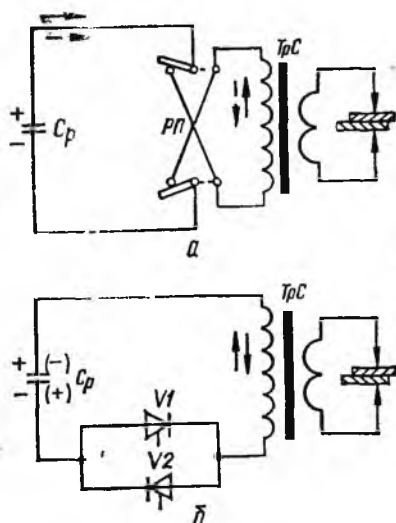


Рис. 101. Принципиальные схемы компенсации потока Φ_0 путем реверсирования разрядного тока конденсаторов, протекающего через первичную обмотку сварочного трансформатора.

которых конструкция конденсаторных машин для пропускания

ного трансформатора целесообразна для конденсаторных машин средней и большой мощности.

Теоретически сечение сердечника сварочного трансформатора машины для точечной и рельефной конденсаторной сварки следует, независимо от того, какова ее мощность, рассчитывать исходя из формулы

$$\Phi_{\max_T} = \Phi_{\max_p} + \Phi_0, \quad (\text{VIII.7})$$

где $\Phi_{\max_T}$ — теоретический максимальный магнитный поток в сердечнике сварочного трансформатора; $\Phi_{\max_p}$ — максимальный расчетный поток.

Однако при условии указанной выше компенсации магнитного потока ($\Phi_0 = 0$) формула (VIII.7) упрощается

$$\Phi_{\max_T} = \Phi_{\max_p}, \quad (\text{VIII.8})$$

Это означает, что определение сечения сердечника сварочного трансформатора можно вести по расчетному магнитному потоку $\Phi_{\max_p}$ (так принято в дальнейшем изложении данного вопроса).

В настоящее время для расчета магнитного потока $\Phi_{\max_p}$ сварочного трансформатора маломощных конденсаторных машин универсального назначения широко применяется упрощенная и практически вполне пригодная методика В. Э. Моравского [137, 142].

В основу этой методики положена формула [82, 142], которая была уточнена¹ в работе [65] и приведена в [137]:

$$\Phi_{\max_p} = \frac{U_c T}{w_1} \left[\frac{1}{\theta} e^{-(\pi - \varphi) \operatorname{ctg} \varphi} + \frac{1}{\theta^2} \right], \quad (\text{VIII.9})$$

где T — постоянная времени эквивалентного контура с активным сопротивлением R и индуктивностью L , $T = L/R$; θ — безразмерный критерий, $\theta = \sqrt{\frac{L}{R^2 C_p}}$ [142].

Если в формуле (VIII.9) обозначить

$$f'(\theta) = \frac{1}{\theta} e^{-(\pi - \varphi) \operatorname{ctg} \varphi} + \frac{1}{\theta^2}, \quad (\text{VIII.10})$$

то такая функция (рис. 2) будет безразмерной. Тогда из формул (VIII.9) и (VIII.10) получаем

$$\Phi_{\max} = \frac{U_c T}{w_1} f'(\theta). \quad (\text{VIII.11})$$

Последнее выражение показывает, что если известны U_c , T , w_1 и критерий θ , определяющий значение $f'(\theta)$, то расчет потока не представляет трудности.

Практически расчет некоторых из этих величин часто оказывается затруднительным. Это объясняется главным образом тем, что при конденсаторной сварке в числе других параметров переменными являются емкость C_p вследствие аккумуляирования в конденсаторах различной по величине энергии для сварки тех или иных материалов;

¹ Это уточнение состоит в том, что в работе [82] ошибочно вместо $(\pi - \varphi)$ было приведено $(\pi + \varphi)$.

сопротивление R ввиду необходимости сваривать большое число различных по толщине и марке материалов, регулировать усилие на электродах и готовить поверхности изделий перед сваркой, кроме того, R зависит от конструктивного выполнения вторичного контура машины и изменяется в процессе сварки; индуктивность L в связи с потребностью изменять по технологическим соображениям коэффициент трансформации сварочного трансформатора.

Поэтому критерий θ из формулы (VIII.9) не может быть взят как постоянная величина

$$\theta = \sqrt{\frac{L}{R^2 C_p}} = T \omega_0 = \text{var} \quad (\text{VIII.12})$$

и в общем случае все входящие в него величины являются переменными (постоянная времени T также не является неизменной величиной, так как она содержит переменные величины R и L).

В связи с изложенным выше практически точный расчет магнитопровода сварочного трансформатора должен выполняться в такой последовательности: по формуле (VIII.12) определяется ряд значений θ_i , соответствующий реальным величинам C_{pi} , R_i и L_i в условиях сварки заданных материалов; по кривой 2 (рис. 102) находятся значения $f'(\theta_i)$, соответствующие полученным θ_i ; по формуле (VIII.11) определяются значения ряда магнитных потоков $\Phi_{\max i}$, соответствующих всем значениям $f'(\theta_i)$, и тогда за расчетный берется наибольший из всех потоков.

Указанные выше расчеты могут быть упрощены, если в формулу (VIII.12) ввести контурный коэффициент

$$k_{LR} = \frac{L}{R^2} = \frac{T}{R} \quad (\text{VIII.13})$$

и получить

$$\theta = \sqrt{\frac{k_{LR}}{C_p}} = \text{var.} \quad (\text{VIII.14})$$

Расчетные кривые зависимости $\theta = f(C_p)$ для значений $k_{LR} = 0,001 \div 0,50$ приведены на рис. 103.

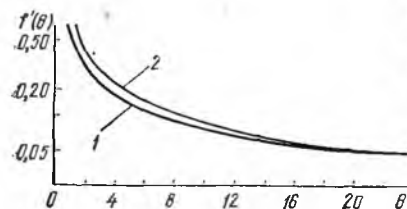


Рис. 102. Расчетные графики функции $f'(\theta)$ для значений критерия $\theta > 0$;

1 — по работе [82]; 2 — по формуле (VIII.9).

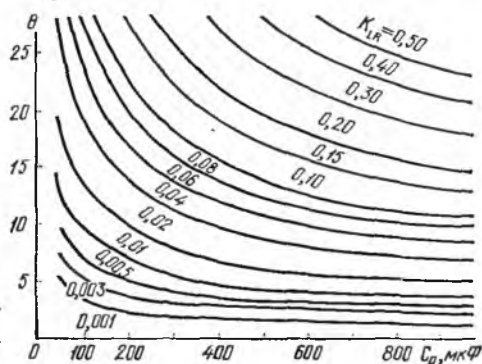


Рис. 103. Расчетные кривые зависимости критерия θ от емкости C_p при различных значениях контурного коэффициента k_{LR} .

Из этого графика, а также из формулы (VIII.14) видно, что с увеличением емкости C_p и при $k_{LR} = \text{const}$ значения критерия θ уменьшаются; с увеличением k_{LR} и при $C_p = \text{const}$ значения критерия θ увеличиваются; критерий θ для определенного значения емкости C_p зависит только от соотношения L и R , выражаемого формулой (VIII.13).

Следует, однако, отметить, что в целом расчет $\Phi_{\max_p}$ по рассмотренной выше методике является громоздким, и поэтому для малоомощных конденсаторных машин применяется еще более простой метод расчета $\Phi_{\max_p}$, сущность которого излагается ниже.

Формула (VIII.9) может быть преобразована таким образом:

$$\Phi_{\max_p} = \frac{U_c T}{w_1 \theta} f''(\theta), \quad (\text{VIII.15})$$

где

$$f''(\theta) = e^{-(\pi - \varphi) \text{ctg } \varphi} + \frac{1}{\theta}. \quad (\text{VIII.16})$$

Выражение (VIII.15) также может быть преобразовано, и из него с учетом формул (I.1) и (VIII.12) получим

$$\Phi_{\max_p} = \sqrt{\frac{2W_k L}{w_1^2}} f''(\theta). \quad (\text{VIII.17})$$

Из уравнения (VIII.17) и при условиях [82, 137], что обычно в конденсаторных машинах $w_2 = 1$ (т. е. $k_t = w_1$), а индуктивность из вторичного контура $L_2' = \frac{L}{w_1^2} = \frac{L}{k_t^2}$, находим

$$\Phi_{\max_p} = \sqrt{2W_k L_2'} f''(\theta). \quad (\text{VIII.18})$$

Из полученной формулы видно, что расчет сварочного трансформатора может быть значительно облегчен, если будет найдено простое решение для определения функции $f''(\theta)$.

Из теоретического анализа этого вопроса и расчетов [142] вытекает следующее: при периодическом, или колебательном, разряде конденсатора, который наиболее характерен для сварки на конденсаторных машинах, наблюдается изменение $f''(\theta)$ в пределах 1—2, а минимум этой функции (порядка 0,8) имеет место при $\theta \approx 3$; при апериодическом разряде наблюдается резкое возрастание функции $f''(\theta)$, которая при $\theta = 0$ стремится к бесконечности.

Таким образом, по форме кривой разрядного тока наиболее подходящим является диапазон $1 < \theta < 3$, при котором функция $f''(\theta)$ близка к минимуму.

При проектировании конденсаторных машин малой мощности можно принять, что практически [142]

$$f''(\theta) \approx 1; \quad \theta \approx 1. \quad (\text{VIII.19})$$

Тогда из формулы (VIII.18) получим

$$\Phi_{\max_p} \approx \sqrt{2W_k L_2'} \quad (\text{VIII.20})$$

Из выражения (VIII.20) видно, что $\Phi_{\max}$ зависит только от значений энергии и индуктивности вторичного контура конденсаторной машины L_2 .

Для расчета параметров таких машин следует учесть принятое допущение, что $f''(\theta) \approx 1$, и определить из этого условия частоту разряда конденсатора ω_0 и число витков первичной обмотки w_1 проектируемого сварочного трансформатора. Эти расчеты следует вести с учетом наибольшего значения $R_{\max}$, при котором постоянная времени T в формуле (VIII.9) будет иметь минимальное значение $T_{\min}$. Тогда при $\theta \approx 1$ из формул (VIII.12) и (VIII.19) получим

$$\omega_0 = \frac{\theta}{T_{\min}} = \frac{1}{T_{\min}}, \quad (\text{VIII.21})$$

где

$$T_{\min} = \frac{L}{R_{\max}}. \quad (\text{VIII.22})$$

Однако определить $T_{\min}$ по формуле (VIII.22) невозможно, пока не будет найдено значение индуктивности эквивалентного контура конденсаторной машины L . Следовательно, значения ω_0 и L могут быть найдены, если известно число витков w_1 .

Приняв во внимание допущение, что $\theta = 1$, $R = \left(\frac{w_1}{w_2}\right)^2 R_2' = k_r^2 R_2'$, $L = \left(\frac{w_1}{w_2}\right) L_2' = k_r^2 L_2'$, из формулы (VIII.12) получим

$$\theta = \frac{w_2}{w_1} \sqrt{\frac{L_{2s}}{R_2'^2 C_p}} \approx 1, \quad (\text{VIII.23})$$

откуда при $w_2 = 1$ имеем

$$w_1 \approx \sqrt{\frac{L_{2s}}{R_2'^2 C_p}}. \quad (\text{VIII.24})$$

Если в выражение (VIII.24) подставить значение C_p из формулы (I.1), то число витков обмотки можно определить по формуле

$$w_1 \approx \frac{U_c}{R_2'} \sqrt{\frac{L_{2s}}{2W_H}}. \quad (\text{VIII.25})$$

Однако опыт проектирования и внедрения точечных конденсаторных машин малой мощности показывает, что практически выбор максимального $w_{1\max}$ и минимального $w_{1\min}$ чисел витков первичной обмотки следует производить по формулам

$$w_{1\max} \approx \frac{U_c}{U_{2\min}}; \quad (\text{VIII.26})$$

$$w_{1\min} \approx \frac{U_c}{U_{2\max}}, \quad (\text{VIII.27})$$

где $U_{2\min}$ и $U_{2\max}$ — минимальное и максимальные напряжения вторичной обмотки сварочного трансформатора (ориентировочно зна-

чения этих напряжений следует соответственно принимать в пределах 4—5 и 8—10 В для стационарных точечных машин малой мощности, а для переносных — 12—15 и 18—25 В).

На основании изложенных выше теоретических предпосылок и из анализа приведенных формул можно сделать следующие выводы и рекомендации по расчету максимального магнитного потока для определения габаритов сердечника сварочного трансформатора конденсаторных машин малой мощности: в качестве исходного уравнения для расчета $\Phi_{\text{max p}}$ может быть взята формула (VIII.9), из которой после преобразований получается вполне пригодная для практического использования и простая формула (VIII.20). Во всех случаях расчета следует не только учитывать остаточный магнитный поток Φ_0 , но и предусматривать мероприятия для его компенсации.

Поперечное сечение железного сердечника сварочного трансформатора следует определять по формуле

$$F_{\text{ж}} = \frac{\Phi_{\text{max p}}}{k_{\text{из}} B_{\text{max}}}, \quad (\text{VIII.28})$$

где $k_{\text{из}}$ — коэффициент, учитывающий наличие изоляции между листами трансформаторной стали [211]; B_{max} — максимальная индукция в стали (Вб/см²).

Необходимо отметить, что нередко случаи, когда определение сопротивлений, а также других величин, требуемых для расчета сварочного трансформатора, оказывается затруднительным. Тогда для грубых ориентировочных расчетов сечения железного сердечника сварочного трансформатора (см²) маломощных конденсаторных машин может быть рекомендована упрощенная эмпирическая формула

$$F_{\text{ж}} \approx \frac{C_{\text{p max}}}{8} \left(\frac{U_{\text{с max}}}{600} \frac{15 \cdot 10^{-5}}{B_{\text{max}}} \right) \approx 3,12 \frac{C_{\text{p max}} U_{\text{с max}}}{B_{\text{max}}} \cdot 10^{-8}. \quad (\text{VIII.29})$$

Наиболее точные значения $F_{\text{ж}}$ получаются при таких параметрах маломощных конденсаторных машин: $C_{\text{p max}} \leq 600 \div 800$ мкФ; $U_{\text{с max}} \leq 600$ В; $w_1 \leq 200 \div 250$; $w_2 = 1$; полезный вылет электродов — до 60—120 мм.

При расчете сварочного трансформатора конденсаторных машин должны определяться эквивалентные разрядные токи в его обмотках [23]. Наиболее просто эквивалентные токи в первичной и вторичной обмотках сварочного трансформатора ($I_{\text{экв1}}$ и $I_{\text{экв2}}$) могут быть рассчитаны по кривым разрядных токов i_1 и i_2 . Для этого из кривых разрядных токов строятся квадраты токов i_1^2 и i_2^2 , а затем в соответствии с формулой (II.54) производится их графическое интегрирование.

Длительные токи в первичной и вторичной обмотках могут быть рассчитаны по формулам

$$I_{\text{д1}} = I_{\text{экв1}} \sqrt{\frac{\text{ПВ}}{100}}; \quad (\text{VIII.30})$$

$$I_{\text{д2}} = I_{\text{экв2}} \sqrt{\frac{\text{ПВ}}{100}}. \quad (\text{VIII.34})$$

Дальнейший расчет сварочного трансформатора конденсаторных машин следует производить так же, как для однофазных контактных машин [211].

Наиболее целесообразной конструкцией является броневого типа сварочного трансформатора, который следует изготавливать с минимальными индуктивностями рассеяния. Достаточно рациональна принятая в машинах типов ТКМ конструкция сварочного трансформатора, имеющего сердечник броневого типа, вторичный виток из жестких элементов большого сечения и первичную обмотку из отдельных дисков катушек, которые укладываются в зазоры между элементами вторичного витка.

Магнитопровод такого сварочного трансформатора изготавливается из штампованных листов трансформаторной стали толщиной 0,35—0,5 мм. Для взаимной изоляции листы необходимо покрывать с одной или с обеих сторон лаком.

В сварочном трансформаторе конденсаторных машин наиболее часто применяется один вторичный виток (выполняется жестким), концы его соединяют с подвижными токоведущими частями конденсаторной машины при помощи специальных гибких шин (из медной фольги или мягкого многожильного провода). Элементы вторичного витка вырезают из медных листов, а затем спаивают между собой латунью (для маломощных машин). Вторичный виток может быть отлит из высокоэлектропроводного медного или алюминиевого сплава. В переносных конденсаторных машинах, где требуется высокое значение вторичного напряжения, необходимо делать не менее двух витков вторичной обмотки.

Первичная обмотка сварочного трансформатора обычно выполняется из медного провода. Рационально применять дисковую обмотку, которую легко ремонтировать (можно заменять отдельные катушки без общей перемотки трансформатора).

Отметим, что сварочные трансформаторы маломощных конденсаторных машин вполне удовлетворительно работают при естественном воздушном охлаждении, что, однако, не исключает необходимости их искусственного охлаждения при недопустимом нагреве, который может иметь место из-за высоких значений ПВ.

Ниже приводится пример расчета сварочного трансформатора маломощных конденсаторных машин.

Разработка сварочного трансформатора точечной конденсаторной машины ТКМ-4 производилась при таких заданных и рассчитанных значениях некоторых параметров: $W_k = 72$ Дж; $L'_2 = 102 \times 10^{-8}$ Гн; $U_c = 600$ В; $U_{2\min} = 4$ В; $U_{2\max} = 8$ В; $B_{\max} = 15 \cdot 10^{-5}$ Вб/см².

По формуле (VIII.20) максимальное значение магнитного потока

$$\Phi_{\max p} \approx \sqrt{2 \cdot 72 \cdot 102 \cdot 10^{-8}} \approx 0,012 \text{ Вб.}$$

Тогда поперечное сечение сердечника сварочного трансформатора при $k_{\text{из}} = 0,92$ по формуле (VIII.28)

$$F_{\text{ж}} = \frac{0,012}{0,92 \cdot 15 \cdot 10^{-5}} \approx 87 \text{ см}^2.$$

Однако практически с учетом рекомендации работы [23] расчетное сечение $F_{жр}$ было выбрано для среднего значения потока $\Phi_{ср}$, при котором

$$F_{жр} = \frac{\Phi_{ср}}{k_{из} B_{max}} = \frac{\Phi_{max_0}}{k_{ф} k_{н.} B_{max}} = \frac{F_{ж}}{k_{ф}} = \frac{87}{1,7} \approx 50 \text{ см}^2.$$

Коэффициент $k_{ф} = \frac{\Phi_{max}}{\Phi_{ср}}$ в среднем можно принимать равным 1,6—1,7. В таком трансформаторе величина зазора $l_{ж}$ (см. рис. 100, а) выбирается в соответствии с рекомендацией работы [184].

Более сложным, чем это описано выше, является расчет сварочного трансформатора конденсаторных машин средней и большой мощности. Это, в частности, обусловлено тем, что упрощения, принятые при расчете такого трансформатора для маломощных машин, обычно не могут быть допущены [183].

Различные методики расчета указанного выше трансформатора приведены в работах [57, 65, 66, 179, 183—185, 187, 211], причем в некоторых из них [184, 187, 211] даются расчеты не только магнитного потока и сечения сердечника трансформатора, но и других его параметров и элементов ¹.

Следует также отметить, что с целью расширения технологических возможностей машин для точечной и рельефной конденсаторной сварки целесообразно изготавливать их сварочные трансформаторы с многими значениями коэффициента $k_{т}$. Это позволяет в еще более широких пределах регулировать форму кривой сварочного тока. Естественно, что если в машинах $U_c = \text{const}$, эту форму можно изменять только регулированием C_p и $k_{т}$ и тогда увеличение числа значений последнего является еще более целесообразным, чем в предыдущем случае (поскольку это в определенной мере компенсирует некоторую ограниченность регулирования формы кривой тока, связанную с $U_c = \text{const}$).

3. Рекомендации по проектированию других узлов

Для выполнения сварки с возможно более высоким КПД (это позволяет уменьшить габариты и массу конденсаторной машины) размеры сварочного контура [203] должны быть как можно меньшими, что в первую очередь достигается благодаря приближению выводов вторичной обмотки сварочного трансформатора к электродным узлам оборудования. Основные элементы сварочного узла (в том числе и гибких шин) должны быть достаточного сечения и изготавливаться из таких высокоэлектропроводных материалов, как медь, латунь и бронза (алюминий и его сплавы нежелательны ввиду

¹ В данной монографии эти вопросы не рассматриваются, учитывая основную ее направленность (применительно к микросварке).

их быстрого и интенсивного окисления в контактных парах сварочного контура).

Необходимость при точечной и рельефной конденсаторной сварке высокой стабилизации усилия сжатия F_s в процессе выполнения прецизионных сварных соединений и обеспечения малой инерционности подвижного (обычно верхнего) электрода соответствующего оборудования требует создания самых различных конструкций механизмов сжатия проектируемых сварочных машин. Основными рекомендациями при разработке указанных выше механизмов сжатия являются следующие. Если должны свариваться между собой тонкие металлические листы или детали из них, когда малая инерционность механизма сжатия не требуется, то можно применять грузовой тип такого механизма (см. рис. 86, а). Если эти соединения должны свариваться с производительностью более 30 точек в минуту, то, как правило, грузовые механизмы нежелательны, поскольку их рычажные системы начинают вибрировать, что неизбежно нарушает стабильность усилия сжатия F_s .

При сварке проволоки с проволокой и с листовой деталью, когда необходима малая инерционность подвижного электрода, достаточно целесообразны механизмы сжатия с плоскими или цилиндрическими пружинами.

Следует также добавить, что в маломощном оборудовании для конденсаторной сварки сопротивлением пружинные механизмы сжатия практически наиболее рациональны и при необходимости работы такого оборудования с высокой производительностью (100—120 и более точек или рельефов в минуту).

При расчете зарядных цепей конденсаторных машин следует пользоваться унифицированной методикой [186]. Сначала определяют соотношение номинального напряжения на конденсаторах $U_{сн}$ к амплитудному значению напряжения переменного тока U_m . При колебаниях напряжения питающей сети в пределах $\pm 15\%$ оптимальный интервал этого соотношения, например, для схем с токоограничивающим конденсатором¹ составляет

$$0,6 \leq U_{сн}/U_m \leq 0,75. \quad (\text{VIII.32})$$

Для выбранного значения $U_{сн}/U_m$ по графикам находят значения безразмерных критериев времени зарядки t_a^* , расчетной мощности P_r^* и пиковой мощности P_n^* . Для двухполупериодной мостовой схемы с токоограничивающим конденсатором при учете указанных выше условий они находятся в пределах [186]

$$1,4 \leq t_a^* \leq 2,25; \quad 1,4 \leq P_r^* \leq 1,6; \quad 1,93 \leq P_n^* \leq 2,0. \quad (\text{VIII.33})$$

На основе этих данных определяют значение токоограничивающего

¹ Эти схемы широко применяются в сварочных машинах,

элемента

$$C_3 = \frac{C_F t_3^*}{\omega t_3}, \quad (\text{VIII.34})$$

расчетную мощность зарядного устройства

$$P_T = P_T^* C_F U_{c_n}^2 \sqrt{\frac{f}{t_3}}, \quad (\text{VIII.35})$$

пиковую мощность в начале зарядки

$$P_n = P_n^* C_F U_{c_n}^2 \frac{1}{t_3}, \quad (\text{VIII.36})$$

где t_3 — время зарядки; f — частота циклов зарядка — разряд;
 ω — угловая частота питающей сети.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Аврамченко П. Ф., Ворона Д. С., Моравский В. Э. и др.* Выбор способа сварки токонесущей части сверхпроводящих ЛЭП.— В кн.: Тез. докл. Моск. авиац. ин-та. М., 1974, с. 40.
2. *Алов А. А., Булагачев Е. А.* Формирование литого ядра при точечной и роликовой сварке.— Автомат. сварка, 1960, № 12, с. 37—45.
3. *Андреев Н. Х.* Новый способ подготовки поверхности деталей из магниевых сплавов под контактную сварку.— Свароч. пр-во, 1957, № 6, с. 8—10.
4. *Ануреев Ю. П., Гавриш В. С.* Программное регулирование режима точечной микросварки.— Вopr. радиоэлектрон. Сер. 4, 1965, вып. 2, с. 60—66.
5. *Атауш В. Е., Рудзит Р. Б., Москвин Э. Г.* Сварка разрядом конденсаторов многожильного медного проводника с кольцом из бронзы.— Свароч. пр-во, 1974, № 4, с. 20—21.
6. *Бабат Г. И.* Точечная и повная сварка разрядом конденсатора.— Электричество, 1935, № 18, с. 23—29.
7. *Балковец Д. С.* Влияние электрических характеристик контактных машин на стабильность сварочного процесса.— Автоген. дело, 1949, № 4, с. 15—17.
8. *Балковец Д. С.* Изучение строения и параметров процесса образования сварной точки.— НИАТ, 1952, № 49.—48 с.
9. *Балковец Д. С.* К вопросу о связи электрических характеристик с технологическими свойствами контактных машин.— Автоген. дело, 1949, № 10, с. 27—30.
10. *Балковец Д. С., Иванов В. К., Стрижевская Л. Г.* Сварка и пайка тугоплавких металлов и сплавов.— В кн.: Тугоплавкие металлы в машиностроении. М.: Машиностроение, 1967, с. 272—291.
11. *Балковец Д. С., Каганов Н. Л.* Некоторые особенности сварки ниобия и его сплавов.— Свароч. пр-во, 1963, № 10, с. 10—12.
12. *Балковец Д. С., Орлов Б. Д., Чулошников П. А.* Точечная и роликовая сварка специальных сталей и сплавов.— М.: Оборонгиз, 1957,— 430 с.

13. Баранов Н. А., Заборский Б. А., Мозов В. М. и др. Механизация точечной конденсаторной сварки контактов.— Свароч. пр-во, 1978, № 1, с. 43—48.
14. Басов Н. П., Бреслав Н. Г. Контактная конденсаторная машина МТК-1601 для точечной сварки черных и цветных металлов малых толщин.— Там же, 1975, № 1, с. 48—49.
15. Белов А. В., Коротяев Н. В. Система автоматической стабилизации напряжения на батареях конденсаторов в сварочных конденсаторных машинах.— Электротехнич. пром-сть. Электросварка, 1974, № 3, с. 8—11.
16. Бердинских Г. С. Зарядное устройство с токоограничивающим конденсатором.— Автомат. сварка, 1968, № 7, с. 77—78.
17. Бердинских Г. С. Исследование режимов работы и выбор оптимальных параметров зарядных устройств с выпрямителями: Автореф. дис. ... канд. техн. наук.— Киев, 1969.— 32 с.
18. Бердинских Г. С. О параметрах зарядного устройства конденсаторной сварочной машины.— Автомат. сварка, 1963, № 11, с. 57—62.
19. Бицоев Г. Д., Атаманов В. Н., Исаев А. П. Изыскание параметров управления процессом конденсаторной сварки с микрозазором.— В кн.: Технология изготовления заготовок в машиностроении. М.: Машиностроение, 1971, с. 70—75.
20. Блитштейн А. З. Плавное регулирование контактных сварочных машин с помощью дросселя в их вторичном контуре.— Автоген. дело, 1947, № 10, с. 15—17.
21. Блитштейн А. З. Об электрических характеристиках контактных машин и их влиянии на стабильность сварочного процесса.— Там же, 1950, № 3, с. 27—29.
22. Братерская Г. Н., Непряхин В. А. Конденсаторная сварка серебряно-никелевых и серебряных контактов.— Автомат. сварка, 1965, № 5, с. 53—55.
23. Браткова О. Н. К расчету сварочного трансформатора конденсаторной точечной машины.— Науч. тр. МВТУ им. Н. Э. Баумана, 1955, № 69, с. 5—12.
24. Браткова О. Н., Назаров Г. В., Лысенко А. С. и др. Источники питания для односторонней контактной микросварки с автоматической подстройкой режима.— Автомат. сварка, 1970, № 9, с. 49—53.
25. Браткова О. Н., Шабалкин С. В., Назаров Г. В. и др. А. с. 238036 (СССР). Устройство для контактной сварки на повышенной частоте.— Опубл. в Б. И., 1969, № 9.
26. Булачев А. Р., Моравский В. Э., Ворона Д. С. и др. А. с. 925581 (СССР). Ручной инструмент для контактной точечной сварки с осевым ходом электродов.— Опубл. в Б. И., 1982, № 17.
27. Бумбиерис Э. В. Исследование процесса контактной сварки серебряных контактов с пластинчатыми пружинами: Автореф. дис. ... канд. техн. наук.— Рига, 1964.— 17 с.
28. Бумбиерис Э. В., Рудзит Р. Б. Конденсаторная сварка серебряных контактов с предварительным формированием.— Автомат. сварка, 1963, № 6, с. 73—78.
29. Вакуленко Е. М. К вопросу о дозировании энергии, накапливаемой в рабочей емкости конденсаторной сварочной машины.— Вестн. Киев. Политехн. ин-та. Сер. Радиоэлектрон., 1965, № 2, с. 80—86.
30. Вишинецкий Б. С. Особенности конденсаторной сварки деталей микроэлектроники.— В кн.: Технология машиностроения. Тула, 1971, с. 62—68.
31. Волченко В. Н. Методика оценки неразрушимости и надежности сварных соединений.— Вестн. машиностроения, 1970, № 12, с. 7—11.
32. Ворона Д. С. Влияние параметров свариваемых материалов на качество точечных соединений, выполненных контактной микросваркой.— В кн.: Вопросы совершенствования процессов микросварки в радиоэлектронике и приборостроении. Киев: О-во «Знание» УССР, 1975, с. 13—23.
33. Ворона Д. С. Дослідження складових сумарного опору в зоні точкового контактної мікрозварювання.— В кн.: Дослідження перехідних опорів в зоні контактної мікрозварювання. К.: Т-во «Знання» УРСР, 1971, с. 14—30.
34. Ворона Д. С. Контактная точечная сварка узлов микрорезисторов.— В кн.: Вопросы технологии микросварки и пайки деталей электронных приборов. Киев: О-во «Знание» УССР, 1975, с. 18—23.

35. Ворона Д. С. Некоторые вопросы повышения качества точечных микросварных соединений.— В кн.: Вопросы повышения качества микросварных соединений в радиоэлектронике. Киев : О-во «Знание» УССР, 1974, с. 11—14.
36. Ворона Д. С. Новая технология и оборудование для прецизионной точечной конденсаторной микросварки.— В кн.: Сварка и пайка элементов полупроводниковых приборов и интегральных схем. Киев : О-во «Знание» УССР, 1974, с. 31—32.
37. Ворона Д. С. Экономическая эффективность и опыт внедрения машин для точечной конденсаторной микросварки изделий повышенной надежности.— Там же, 1973, с. 29—30.
38. Ворона Д. С., Груша В. А. Способ изготовления шлифов микросварных соединений.— Автомат. сварка, 1980, № 11, с. 75—77.
39. Ворона Д. С., Лебедев В. К., Моравский В. Э. и др. А. с. 230334 (СССР). Способ контактной электросварки.— Опубл. в Б. И., 1968, № 34.
40. Ворона Д. С., Моравский В. Э. Вопросы повышения качества точечных микросварных соединений в радиоэлектронике.— Киев : О-во «Знание» УССР, 1972.— 32 с.
41. Ворона Д. С., Моравский В. Э. Новая технология и оборудование для контактной микросварки в радиоэлектронике и приборостроении.— Киев : О-во «Знание» УССР, 1979.— 24 с.
42. Ворона Д. С., Моравский В. Э. Пути снижения брака и повышения производительности сварочного производства изделий радиоэлектроники и приборостроения.— Киев : О-во «Знание» УССР, 1980.— 38 с.
43. Ворона Д. С., Фортунатова Н. А. Стабильность сопротивления зоны контактной точечной микросварки при подогреве.— В кн.: Повышение эффективности исследований в сварочной науке и технике путем применения математических методов. Киев : О-во «Знание» УССР, 1973, с. 42—43.
44. Ворона Д. С., Фортунатова Н. А., Касаткин О. Г. О величине сопротивления контакта при точечной микросварке.— Автомат. сварка, 1973, № 2, с. 27—31.
45. Гаерши В. С. Программное управление кратковременными процессами точечной сварки : Автореф. дис. ... канд. техн. наук.— Киев, 1965.— 16 с.
46. Гаерши В. С., Гродецкий Ю. С., Шиганский В. В. Новая схема точечной контактной машины для микросварки.— Автомат. сварка, 1967, № 7, с. 62—63.
47. Гальчинский Л. В. Механизмы сжатия для импульсной сварки.— Докл. Львов. политех. ин-та, 1961, № 5, вып. 1, с. 171—176.
48. Гаспила Л. И. Сопротивление пластинки при точечной сварке.— Автоген. дело, 1950, № 9, с. 17—18.
49. Гельман А. С. Контактная электросварка.— М. : Машгиз, 1949.— 499 с.
50. Гельман А. С. Начальное электрическое сопротивление при точечной сварке.— Автомат. сварка, 1961, № 7, с. 25—32.
51. Гельман А. С. Основы сварки давлением.— М. : Машиностроение, 1970.— 312 с.
52. Гельман А. С. Технология и оборудование контактной электросварки.— М. : Машиностроение, 1960.— 367 с.
53. Гетцель К. Получение, свойства и применение ниобия и тантала.— В кн.: Ниобий и тантал, М. : Изд-во иностр. лит., 1954, с. 17—51.
54. Гиллеши В. А. Технология и оборудование рельефной сварки.— Л. : Машиностроение, 1966.— 152 с.
55. Гладков А. С., Амосов В. М., Копецкий И. В. Металлы и сплавы для электровакуумных приборов.— М. : Энергия, 1969.— 600 с.
56. Глебов Л. В. К расчету индуктивности вторичных контуров машин для контактной сварки.— Автомат. сварка, 1964, № 7, с. 54—57.
57. Глебов Л. В., Пискарев Н. А., Файгенбаум Д. С. Расчет и конструирование машин контактной сварки.— Л. : Энергоиздат, 1981.— 424 с.
58. Глебов Л. В., Радшикович И. М. Электрическое сопротивление деталей при шпальной сварке.— Свароч. пр-во, 1964, № 5, с. 11—13.
59. Гончаров Г. И., Кутковский С. И. Опыт унификации и нормализации электродов для контактной сварки в приборостроении.— Л. : О-во «Знание» РСФСР, 1966.— 20 с.

60. Горбанский В. В. Исследование и разработка технологии точечной электроконтактной сварки и пайки внутренних деталей электровакуумных приборов и разработка нового оборудования : Автореф. дис. ... канд. техн. наук.— М., 1959.— 12 с.
61. Горелик М. Б., Золотников Л. Н. Применение точечной конденсаторной электросварки в ювелирной промышленности.— Сб. тр. Всесоюз. н.-и. и проектно-констр. ин-та ювелир. пром-сти, 1971, вып. 1, с. 113—120.
62. Горожанинов Н. Е. Сопротивление деталей при точечной сварке с подогревом неочищенной горячекатаной стали.— Свароч. пр-во, 1963, № 1, с. 13—14.
63. Грабин В. Ф., Денисенко А. В., Новикова Д. П. и др. Реактивы для выявления макро- и микроструктур сварных соединений сталей и сплавов.— Киев : Наук. думка, 1977.— 119 с.
64. Гришин В. Л., Гришина А. Д. Точечная сварка ниобия.— Цв. металлы, 1964, № 10, с. 67—68.
65. Гульденбалк А. П. К определению основных характеристик установок конденсаторной сварки.— Науч.-техн. информ. бюл. Ленингр. политехн. ин-та 1957, № 6, с. 21—24.
66. Гульденбалк А. П. Расчет максимального изменения магнитного потока трансформатора установки конденсаторной сварки с учетом активного сопротивления и индуктивности рассеяния первичной цепи.— Тр. Ленингр. политехн. ин-та. Сер. Свароч. пр-во, 1966, № 262, с. 101—109.
67. Гуляев А. И. Технология точечной и рельефной сварки сталей.— М. : Машиностроение, 1978.— 246 с.
68. Гуревич С. М., Нероденко М. М., Харченко Г. К. и др. Металлургия и технология сварки тугоплавких металлов и сплавов на их основе.— Киев : Наук. думка, 1982.— 304 с.
69. Гуревич С. М. Справочник по сварке цветных металлов.— Киев : Наук. думка, 1981.— 608 с.
70. Демкин Н. Б. Фактическая площадь касания твердых поверхностей.— М. : Изд-во АН СССР, 1962.— 114 с.
71. Денисенко Э. Т., Сахненко А. В., Ворона Д. С. и др. Технология производства и эксплуатационные свойства электродов из спеченной меди с дисперсными окислами.— В кн.: Электрические контакты и электроды. Киев : Наук. думка, 1977, с. 191—198.
72. Енин В. Т. К вопросу о конструкции электросварочной машины конденсаторного типа.— Автоматизация в машиностроении, 1959, № 2, с. 253—258.
73. Ефтифеев П. И. Стыковая микросварка : (Технология и оборудование).— Л. : Машиностроение, 1977.— 203 с.
74. Жуковский В. Д. О контактном сопротивлении деталей при сварке.— Свароч. пр-во, 1958, № 7, с. 23—27.
75. Завадский В. А. Измерение и регулирование тока при контактной сварке : Автореф. дис. ... канд. техн. наук.— Киев, 1966.— 17 с.
76. Завадский В. А. Новый источник сварочного тока для контактной микросварки.— Автомат. сварка, 1982, № 8, с. 64—66.
77. Зайцев М. П. Об электрических схемах машин для контактной сварки металла малых толщин.— Там же, 1958, № 8, с. 84—88.
78. Зайчик Л. В., Орлов Б. Д., Чулошников П. Л. Контактная электросварка легких сплавов.— М. : Машиностроение, 1963.— 220 с.
79. Зайчик Л. В., Комарчев А. И., Чулошников П. Л. Конденсаторные машины для точечной сварки легких сплавов.— Свароч. пр-во, 1966, № 4, с. 40—42.
80. Злобин Г. И. Образование соединения при сварке контактов низковольтной аппаратуры.— ЭП. Электросварка, 1980, № 1, с. 7—9.
81. Золотарев Б. В. Распределение напряжений под нагрузкой в точечном соединении.— Автомат. сварка, 1960, № 3, с. 18—21.
82. Зотов В. П. Сварка аккумулированной энергией.— Электричество, 1948, № 11, с. 55—58.
83. Иванов А. А., Моравский В. Э., Ворона Д. С. и др. Непрерывный участок сварки и укладки катодов в технологическую тару.— Электрон. техника. Сер. Технология и орг. пр-ва, 1966, вып. 2, с. 60—83.
84. Иорш А. Е., Кацман Я. А., Птицина С. В. Основы технологии производства электровакуумных приборов.— М. : Госэнергиздат, 1961.— 516 с.

85. *Каганов Н. Л.* Некоторые результаты разработки, исследования и внедрения конденсаторных машин МВТУ.— *Вопр. радиоэлектрон. Сер. 4. Технология пр-ва и оборудование*, 1965, вып. 2, с. 45—50.
86. *Каганов Н. Л.* Перспективы развития, методы и средства совершенствования конденсаторной сварки.— *В кн.: Автоматизация и механизация производственных процессов в машиностроении*. М.: Машиностроение, 1967, с. 225—236.
87. *Каганов Н. Л., Атаманов В. Н., Трощенко Д. И.* Разработка технологии конденсаторной сварки пленочных схем.— *В кн.: Надежность сварных соединений и конструкций*. М.: Машиностроение, 1967, с. 140—145.
88. *Каганов Н. Л., Беризенко В. П.* Особенности образования соединений при конденсаторной контурной сварке.— *Свароч. пр-во*, 1973, № 7, с. 21—23.
89. *Каганов Н. Л., Татаринов Е. А.* Конденсаторная контурная сварка корпусов полупроводниковых приборов.— *Изв. вузов. Машиностроение*, 1975, № 8, с. 134—138.
90. *Каганов Н. Л., Чередниченко Н. Г.* Оценка пластичности крестообразных соединений микродеталей, выполненных контактной сваркой.— *Автомат. сварка*, 1965, № 11, с. 44—48.
91. *Каганов Н. Л., Чередниченко Н. Г.* Повышение качества точечных соединений в электролампках.— *Свароч. пр-во*, 1965, № 12, с. 11—13.
92. *Калеко Д. М.* Сравнение методов подготовки поверхностей алюминиевых сплавов перед точечной конденсаторной сваркой.— *В кн.: Сварка специальных металлов и сплавов*. Киев: Изд-во АН УССР, 1963, с. 48—59.
93. *Калеко Д. М., Моравский В. Э., Чертко Н. А.* Ударная конденсаторная сварка.— Киев: Наук. думка, 1984.— 198 с.
94. *Касаткин О. Г., Ланкин Ю. Н., Стеренbogen Ю. А. и др.* Использование регрессивного анализа для изучения сварочных процессов.— *Автомат. сварка*, 1970, № 3, с. 5—10.
95. *Кашурников Ю. М.* Нагрев зоны контакта при конденсаторной сварке круглых перекрещивающихся проводников.— *Свароч. пр-во*, 1969, № 4, с. 29—31.
96. *Кашурников Ю. М., Лысенко А. С.* А. с. 173354 (СССР). Машина для конденсаторной сварки.— *Опубл. в Б. И.* 1965, № 15.
97. *Кислюк Ф. И.* Электрическая контактная сварка.— М.: Оборонгиз, 1950.— 396 с.
98. *Кислюк Ф. И., Горбанский В. В.* Новая машина для точечной сварки деталей приемно-усилительных ламп.— *Свароч. пр-во*, 1958, № 3, с. 39—43.
99. *Колпачев Б. А., Ливанов В. А., Елагин В. И.* Металловедение и термическая обработка цветных металлов и сплавов.— М.: Металлургия, 1972.— 480 с.
100. *Комарчев А. И.* А. с. 228811 (СССР). Машина для конденсаторной сварки.— *Опубл. в Б. И.*, 1968, № 32.
101. *Комарчев А. И., Миркин А. М., Морев К. В. и др.* Конденсаторная машина МТК-15 для сварки корпусов полупроводниковых приборов.— *Свароч. пр-во*, 1966, № 10, с. 36—38.
102. *Комарчев А. И., Суворова Г. А., Федоров П. Д.* Серия конденсаторных машин для герметизации изделий электротехнической промышленности.— *Электротехника*, 1982, № 5, с. 31—33.
103. *Конденсаторная машина МТК-1601*.— *Автомат. сварка*, 1974, № 12, на обложке.
104. *Конденсаторные машины для контактной сварки корпусов полупроводниковых приборов*.— *Свароч. пр-во*, 1974, № 1, с. 49.
105. *Конденсаторная машина ТКМ-15*.— *Автомат. сварка*, 1976, № 6, на обложке.
106. *Конденсаторные машины МРК-4001, МРК-10001 и МТК-8002*.— Там же, 1974, № 3, на обложке.
107. *Конденсаторные машины МТК-5001 и МТК-1601*.— Там же, 1975, № 3, 5, на обложке.
108. *Кочергин К. А.* Вопросы теории контактной сварки.— М.: Машгиз, 1950.— 104 с.
109. *Кочергин К. А.* Выбор технологии контактной сварки.— Л.: Судпромгиз, 1952.— 110 с.

110. *Кочергин К. А.* Импульсная контактная сварка.— Л. : Лениздат, 1961.
111. *Кочергин К. А.* Полярные явления в процессах сварки.— Тр. Ленингр. политехн. ин-та. Сер. Свароч. пр-во, 1961, № 216, с. 154—159.
112. *Кочергин К. А.* Сварка давлением.— Л. : Машиностроение, 1972.— 216 с.
113. *Кривов В. В., Терентьев В. Р., Ральков А. И.* Конденсаторная сварка лагуновой сетки.— Хим. и нефть. машиностроение, 1967, № 2, с. 35.
114. *Куканов Ю. А., Чулошников П. Я.* Точечная конденсаторная машина МТК-8004.— Свароч. пр-во, 1976, № 11, с. 47—48.
115. *Кутковский С. И.* Электроды контактных электросварочных машин.— М. : Машиностроение, 1964.— 112 с.
116. *Ларри О. Я.* Контактная конденсаторная машина МТК-5001.— Свароч. пр-во, 1975, № 5, с. 49—50.
117. *Лашко Н. Ф., Лашко С. В.* Пайка металлов.— М. : Машиностроение, 1977.— 328 с.
118. *Лебедев В. К., Пентегов И. В., Стемковский Е. П. и др.* Защита тиристорov в разрядных цепях конденсаторных сварочных машин.— Электротехника, 1969, № 5, с. 3—6.
119. *Лебедев В. К., Яворский Ю. Д.* Применение критериев подобия для определения режимов контактной сварки.— Автомат. сварка, 1960, № 8, с. 37—45.
120. *Липа М., Голасек Я.* Контактная рельефная сварка.— Киев : Техніка, 1971.— 322 с.
121. *Литвин Л. В., Яворский Ю. Д., Семергеев С. И.* А. с. 282549 (СССР). Способ сварки тугоплавких металлов давлением.— Оpubл. в Б. И., 1970, № 30.
122. *Луцкий В. А.* Расчет надежности и эффективности радиоэлектронной аппаратуры.— Киев : Наук. думка, 1966.— 108 с.
123. *Луфт Б. Д., Шустина А. П.* Очистка деталей электронных приборов.— М. : Энергия, 1968.— 320 с.
124. *Мальцев М. В.* Металлография промышленных цветных металлов и сплавов.— М. : Металлургия, 1970.— 304 с.
125. *Мера В.* Электрический контакт.— М. : Госэнергоиздат, 1962.— 80 с.
126. *Мещеряк С. Н., Пентегов И. В.* Определение омических сопротивлений деталей при точечной контактной сварке.— Автомат. сварка, 1967, № 3, с. 34—36.
127. *Мещеряк С. Н., Пентегов И. В., Стемковский Е. П.* Зарядно-разрядные устройства конденсаторных сварочных машин с динисторным управлением.— Там же, 1972, № 9, с. 59—61.
128. *Мещеряк С. Н., Пентегов И. В., Стемковский Е. П. и др.* А. с. 237299 (СССР). Двухимпульсная конденсаторная сварочная машина.— Оpubл. в Б. И., 1972, № 27.
129. *Моравский В. Э.* А. с. 148465 (СССР). Способ контактной конденсаторной сварки.— Оpubл. в Б. И., 1962, № 13.
130. *Моравский В. Э.* Вопросы стабильности электрической контактной микро-сварки.— Киев : КДНТП, 1969.— 68 с.
131. *Моравский В. Э.* Исследование конденсаторной сварки металла малых толщин : Автореф. дис. ... канд. техн. наук.— Киев, 1955.— 17 с.
132. *Моравский В. Э.* Вопросы теории, технологии и оборудования конденсаторной микросварки : Автореф. дис. ... д-ра техн. наук.— Киев, 1969.— 62 с.
133. *Моравский В. Э.* Конденсаторная сварка тонких изделий из различных металлов.— К. : Київ. правда, 1952.— 18 с.
134. *Моравский В. Э.* Конденсаторная сварка тонких изделий из различных металлов и сплавов.— Автоген. дело, 1953, № 3, с. 23—26.
135. *Моравский В. Э.* Конденсаторная сварка металлов малых толщин.— М. : Машгиз, 1960.— 144 с.
136. *Моравский В. Э.* Конденсаторная сварка металла малых толщин и опыт ее внедрения в приборостроение.— В кн.: Передовая технология. М. : Машиностроение, 1955, с. 329—348.
137. *Моравский В. Э.* Конденсаторная сварка металлов : Справочник.— Киев : Наук. думка, 1964.— 300 с.
138. *Моравский В. Э.* К расчету сварочного трансформатора точечных конденсаторных машин малой мощности.— Автомат. сварка, 1962, № 2, с. 27—31.

139. Моравский В. Э. Новые конденсаторные машины для точечной сварки тонкого металла.— Свароч. пр-во, 1958, № 1, с. 40—42.
140. Моравский В. Э. Новое в конденсаторной сварке металлов малых толщин и сечений.— М., 1960.— 42 с.— (Центр. ин-т техн.-эконом. инф. ГКНТ РСФСР; № М-60-105/7).
141. Моравский В. Э. О методе расчета накопленной энергии для точечной конденсаторной сварки тонкого металла.— Автомат. сварка, 1961, № 2, с. 64—68.
142. Моравский В. Э. Сварка аккумулированной энергией.— Киев : Гостехиздат УССР, 1963.— 298 с.
143. Моравский В. Э. Современное состояние исследований и внедрения контактной микросварки.— Киев : О-во «Знание» УССР, 1970.— 26 с.
144. Моравский В. Э. Точечная конденсаторная машина типа ТКМ-4.— Киев : Изд-во АН УССР, 1954.— с. 15— 32.
145. Моравский В. Э. Точечная конденсаторная машина типа ТКМ-7.— Мин. энергетики и электрификации СССР, 1958, с. 15—27.
146. Моравский В. Э. Точечная конденсаторная машина ТКМ-8 для сварки металлов малых толщин.— Автомат. сварка, 1960, № 6, с. 63—68.
147. Моравский В. Э. Точечная конденсаторная машина типа ТКМ-8. — Мин. энергетики и электрификации СССР, 1962, с. 16—32.
148. Моравский В. Э., Ворона Д. С. Основные недостатки оборудования для точечной контактной микросварки в электронике и прецизионном приборостроении.— Киев : КДНТП, 1968.— 34 с.
149. Моравский В. Э., Ворона Д. С. Новое в теории, оборудовании и технологии сварочного производства в радиоэлектронике.— Киев : О-во «Знание» УССР, 1978.— 24 с.
150. Моравский В. Э., Ворона Д. С. Современное оборудование для контактной микросварки.— Киев : О-во «Знание» УССР, 1979.— 30 с.
151. Моравский В. Э., Ворона Д. С. Точечная конденсаторная сварка металлов малых толщин и сечений.— Киев : Наук. думка, 1968 (плакаты, ч. 1, 2).
152. Моравский В. Э. Сварка в радиоэлектронной и приборостроительной промышленности.— В кн.: Сварка в СССР. М.: Наука, 1981. Т. 2, с. 349—361.
153. Моравский В. Э., Ворона Д. С., Груша В. А. и др. А. с. 1016108 (СССР). Способ контактной сварки.— Опубл. в Б. И., 1983, № 17.
154. Моравский В. Э., Ворона Д. С., Иоран Н. Л. Машина ССПИ-1 для точечной контактной конденсаторной микросварки ручным инструментом.— Киев, 1977.— [4] с.— (Информ. письмо / АН УССР. Ин-т электросварки; № 42).
155. Моравский В. Э., Ворона Д. С., Иоран Н. Л. Модернизированный источник питания машины ТКМ-7 для точечной конденсаторной микросварки.— Автомат. сварка, 1973, № 2, с. 74—75.
156. Моравский В. Э., Ворона Д. С., Иоран Н. Л. Переносная машина для конденсаторной сварки.— Там же, 1974, № 4, с. 54—56.
157. Моравский В. Э., Ворона Д. С., Иоран Н. Л. и др. Машина ТКМ-17 для точечной конденсаторной сварки.— Киев, 1982.— [4] с.— (Информ. письмо / АН УССР. Ин-т электросварки; № 41).
158. Моравский В. Э., Ворона Д. С., Иоран Н. Л. и др. Установка ТКМ-20 для точечной рельефной контактной конденсаторной микросварки.— Киев, 1980.— [4] с.— (Информ. письмо / АН УССР. Ин-т электросварки; № 5).
159. Моравский В. Э., Ворона Д. С., Романов С. В. и др. Серийные конденсаторные машины для точечной и рельефной контактной микросварки в среде обеспыленного воздуха.— Киев, 1980.— [4] с.— (Информ. письмо / АН УССР. Ин-т электросварки; № 21).
160. Моравский В. Э., Ворона Д. С., Пентегов И. В. и др. Точечная конденсаторная машина ТКМ-14.— Киев, 1974.— [4] с.— (Информ. письмо / АН УССР. Ин-т электросварки; № 21).
161. Моравский В. Э., Ворона Д. С., Шинкаренко Б. П. и др. Точечная конденсаторная машина ТКМ-15.— Киев, 1977.— [4] с.— (Информ. письмо / АН УССР. Ин-т электросварки; № 22).
162. Моравский В. Э., Корж В. Н., Свидагерол С. П. Исследование образования крестообразных соединений проволок при точечной конденсаторной сварке.— Автомат. сварка, 1980, № 9, с. 33—36.
163. Моравский В. Э., Россошинский А. А. О структурных особенностях точек

- при конденсаторной сварке разнородных металлов малых и неравных толщин.— Там же, 1958, № 10, с. 90—91.
164. Моравский В. Э., Семергеев С. И. Монтажная точечная конденсаторная сварка жаропрочных металлов неравных толщин.— В кн.: Сварка цветных и черных металлов. Киев : Изд-во АН УССР, 1963, с. 39—48.
 165. Моравский В. Э., Семергеев С. И., Ворона Д. С. Вопросы повышения качества и эффективности сварочного производства в радиоэлектронике и точном приборостроении.— Киев : О-во «Знание» УССР, 1977.— 32 с.
 166. Моравский В. Э., Семергеев С. И., Ворона Д. С. Двухточечная конденсаторная сварка проволоочных контактов из серебряных сплавов.— Автомат. сварка, 1965, № 8, с. 62—66.
 167. Моравский В. Э., Семергеев С. И., Ворона Д. С. Двухточечная конденсаторная машина ТКМ-11 для сварки проволоочных серебряных контактов.— Там же, 1964, № 12, с. 68—72.
 168. Моравский В. Э., Сузов О. В., Ворона Д. С. А. с. 199299 (СССР). Устройство для автоматического регулирования дозировки энергии при контактной сварке.— Оpubл. в Б. И., 1967, № 15.
 169. Моравский В. Э., Сузов О. В., Ворона Д. С. и др. А. с. 274259 (СССР). Конденсаторная машина для контактной микросварки.— Оpubл. в Б. И., 1970, № 21.
 170. Назаров Г. В., Гревцев Н. В. Сварка и пайка в электронике.— М.: Сов. радио, 1969.— 192 с.
 171. Науцюкайтис С. И. Влияние шероховатости поверхности пластинок при точечной сварке углеродистой стали : Автореф. дис. ... канд. техн. наук.— Каунас, 1961.— 21 с.
 172. Непряхин В. А., Яценко В. А., Ворона Д. С. Применение сварки при изготовлении функциональных модулей.— Обмен опытом в радиопром-сти, 1973, № 5, с. 12—14.
 173. Николаев А. К., Розенберг В. М. Сплавы для электродов контактной сварки.— М.: Металлургия, 1978.— 95 с.
 174. Орлов Б. Д., Чулошников П. Л., Верденский В. Б. и др. Контроль точечной и роликовой электросварки.— М.: Машиностроение, 1973.— 304 с.
 175. Орлов Б. Д., Дмитриев Ю. В., Чакалев А. А. и др. Технология и оборудование контактной сварки.— М.: Машиностроение, 1975.— 536 с.
 176. Очистка деталей электронных приборов.— М.: Энергия, 1964.— 312 с.
 177. Патон В. Е., Гавериш В. С. Оптимальная система регулирования энергетических параметров точечной и шовной сварки.— Автомат. сварка, 1961, № 4, с. 18—24.
 178. Патон В. Е., Гавериш В. Е., Гродецкий Ю. С. Безынерционные схемы автоматического регулирования процессов контактной сварки.— Там же, 1963, № 5, с. 7—10.
 179. Патон В. Е., Лебедев В. К. Электрооборудование для контактной сварки.— М.: Машиностроение, 1969.— 440 с.
 180. Патон В. Е., Подола Н. В. Новые схемы автоматического управления и регулирования машин для контактной сварки.— Автомат. сварка, 1962, № 10, с. 1—8.
 181. Паченцев Ю. А. Автоматическое управление процессом точечной сварки по величине теплового расширения металла : Автореф. дис. ... канд. техн. наук.— Киев, 1955.— 14 с.
 182. Паченцев Ю. А. Регулирование процесса точечной сварки по величине перемещения электродов сварочной машины.— Автомат. сварка, 1951, № 5, с. 18—29.
 183. Пентегов И. В. Электромагнитные процессы при разряде батареи конденсаторов на сварочный трансформатор в конденсаторных сварочных машинах.— В кн.: Сварка специальных металлов и сплавов. Киев : Изд-во АН УССР, 1963, с. 59—88.
 184. Пентегов И. В., Стежковский Е. П., Шейковский Д. А. Расчет сварочного трансформатора для контактной сварки.— Автомат. сварка, 1980, № 3, с. 26—30.
 185. Пентегов И. В. Расчет магнитного потока в сварочном трансформаторе конденсаторных сварочных машин.— Там же, 1981, № 12, с. 17—20.

186. *Пентегов И. В.* Основы теории зарядных цепей емкостных накопителей энергии.— Киев : Наук. думка, 1982.— 424 с.
187. *Пентегов Е. П., Стемковский Е. П., Шейковский Д. А.* Определение оптимальных параметров сварочных трансформаторов контактных машин с заданным сопротивлением обмоток.— Автомат. сварка, 1983, № 11, с. 35—40.
188. *Пентегов И. В., Мецержак С. Н., Стемковский Е. П. и др.* Двухимпульсный источник питания для точечной контактной конденсаторной сварки.— Там же, 1973, № 5, с. 62—64.
189. *Пентегов И. В., Мецержак С. Н.* Управление формой импульса сварочного тока в конденсаторных машинах.— Там же, 1967, № 5, с. 78—79.
190. *Пентегов И. В., Стемковский Е. П., Мецержак С. Н. и др.* А. с. 251114 (СССР). Машина для точечной конденсаторной контактной сварки.— Оpubл. в Б. И., 1981, № 2.
191. *Пентегов И. В., Моравский В. Э., Мецержак С. Н. и др.* А. с. 220377 (СССР). Двухимпульсная конденсаторная сварочная машина.— Оpubл. в Б. И., 1968, № 20.
192. *Пентегов И. В., Стемковский Е. П., Шейковский Д. А., Мецержак С. Н.* Устройство для стабилизации напряжения зарядки батареи конденсаторов.— Электротех. пр-сть. Сер. Электросварка, вып. 8, 1971, с. 5—6.
193. *Пентегов И. В., Стемковский Е. П., Мецержак С. Н. и др.* А. с. 301965 (СССР). Двухимпульсная машина для точечной конденсаторной сварки.— Оpubл. в Б. И., 1975, № 31.
194. *Пентегов И. В., Стемковский Е. П., Шейковский Д. А.* Расчет сварочного трансформатора для контактной конденсаторной сварки.— Автомат. сварка, 1980, № 3, с. 26—30.
195. *Петров Г. Л., Тумарев А. С.* Теория сварочных процессов.— М. : Высш. шк., 1977.— 392 с.
196. *Пинский М. Б., Федотов Б. В.* Новый способ герметизации корпусов микроприборов конденсаторной сваркой.— Тр. Ленингр. политехн. ин-та. Сер. Свароч. пр-во, 1978, № 364, с. 67—70.
197. *Подола Н. В., Моравский В. Э., Ворона Д. С. и др.* Прогнозирование качества соединений, выполненных контактной микросваркой.— Автомат. сварка, 1980, № 12, с. 35—37.
198. *Пугачев А. И., Рязанцев В. И., Сабитов И. И.* Конденсаторная точечная сварка сплава Д16Т по клею ВК-1МС.— Свароч. пр-во, 1969, № 1, с. 25—27.
199. *Пугачев А. И.* Технология подготовки алюминиевых сплавов под контактную сварку.— Автоген. дело, 1950, № 2, с. 21—25.
200. *Пятих Ю. М., Чернявская А. М., Владимирский Р. А. и др.* Материалы в приборостроении и автоматике : Справочник.— М. : Машиностроение, 1982.— 528 с.
201. *Рабинович И. Я.* Основы теории контакта и теплопередачи при стыковой сварке сопротивлением.— М. : Машгиз, 1959.— 88 с.
202. *Рабин Д. М., Рябов В. Р., Гуревич С. М.* Сварка разнородных металлов.— Киев : Техніка, 1975.— 208 с.
203. *Радзикович И. М.* Повышение надежности аторичных контуров контактных машин.— Автомат. сварка, 1966, № 2, с. 67—68.
204. *Ренне В. Т.* Электрические конденсаторы.— М. : Энергия, 1969.— 592 с.
205. *Россошинский А. А., Запалитная В. Ф., Кислицын В. М.* Влияние давления на фактическую площадь касания при сварке давлением.— Автомат. сварка, 1969, № 7, с. 23—24.
206. *Россошинский А. А., Лебига В. А., Кислицын В. М.* Влияние ультразвука на контактное сопротивление металлов при микросварке.— Электрон. техника. Сер. 10, Технология и орг. пр-ва, 1968, № 1, с. 11—14.
207. *Россошинский А. А., Табелев В. Д., Лебига В. А. и др.* Микросварка давлением.— Киев : Техніка, 1971.— 152 с.
208. *Рудзит Р. Б., Бужбиерис Э. В., Москвин Э. Г. и др.* Влияние формы импульса тока и динамики механизма сжатия на процесс конденсаторной сварки металлокерамического коллекторного кольца с изолированным проводником.— В кн.: Автоматизация производственных процессов в машиностроении и приборостроении, Рига : Зинатне, 1969, с. 101—109.

209. Рудзит Р. Б., Калейс М. А. Конденсаторная сварка проводников вкрест с локальным разрушением изоляции.— Автомат. сварка, 1970, № 1, с. 49—53.
210. Рудзит Р. Б., Калейс М. А. Влияние динамики механизма сжатия на концентрацию нагрева при Т-образной конденсаторной сварке.— Там же, с. 49—52.
211. Рыськова З. А. Трансформаторы для электрической контактной сварки.— Л.: Энергия, 1975.— 280 с.
212. Сварочное оборудование: Каталог-справочник.— Киев: Наук. думка, 1968.— Ч. 2. 387 с.
213. Семергеев С. И. Особенности технологии герметизации электровакуумных приборов и чувствительных элементов шовной контактной сваркой.— В кн.: Сварка тонкого металла. Киев: О-во «Знание» УССР, 1968, с. 17—36.
214. Семергеев С. И., Литвин Л. В. Технологические условия обеспечения качества соединений при шовной конденсаторной сварке металлов малых толщин.— В кн.: Вопросы повышения качества микросварных соединений в радиоэлектронике. Киев: О-во «Знание» УССР, 1974, с. 12—16.
215. Слиозберг С. К., Ткачевская Г. Д. Химическая и структурная неоднородность соединения разнородных metalloа при контактной сварке.— В кн.: Неоднородность сварных соединений и ее влияние на работоспособность: Докл. темат. координац. совещ. Челябинск: Южно-Урал. кн. изд-во, 1968, с. 69—72.
216. Слиозберг С. К., Чулошников П. Л. Электроды для контактной сварки.— Л.: Машиностроение, 1972.— 95 с.
217. Соколов Н. М. Электрооборудование для прецизионной точечной сварки.— Саратов: Приволж. кн. изд-во, 1964.— 208 с.
218. Стежковский Е. П., Иоран Н. Л., Ворона Д. С. и др. Измерение быстроменяющегося омического сопротивления зоны точечной контактной сварки.— Автомат. сварка, 1973, № 10, с. 61—63.
219. Стежковский Е. П., Шейковский Д. А., Пентегов И. В. и др. Улучшение эксплуатационных характеристик двухимпульсных конденсаторных источников питания для точечной контактной сварки.— Там же, 1979, № 11, с. 61—66.
220. Таран Ю. М. А. с. 200056 (СССР). Устройство для обнаружения выплесков при точечной и шовной сварках.— Оpubл. в Б. И., 1967, № 14.
221. Тарасов Н. М. Импульсные машины переменного тока для контактной сварки металла малой толщины.— Автомат. сварка, 1960, № 12, с. 46—54.
222. Федорченко И. М., Моравский В. Э., Ворона Д. С. и др. Новые электроды из дисперсноупрочненной меди для точечной контактной сварки.— Киев, 1978.— [4] с.— (Информ. письмо / АН УССР. Ин-т электросварки; № 44).
223. Фрюнгель Ф. Импульсная техника: Генерирование и применение разрядов конденсаторов: Пер. с нем.— М.; Л.: Энергия, 1965.— 488 с.
224. Хан Г., Шапиро С. Статистическая модель в инженерных задачах.— М.: Мир. 1969.— 400 с.
225. Хольм Р. Электрические контакты.— М.: Изд-во иностр. лит., 1961.— 464 с.
226. Целмс Э. Ж., Рудзит Р. Б. Компенсация термоэлектрических эффектов при конденсаторной сварке трехслойных соединений.— В кн.: Автоматизация производственных процессов в машиностроении и приборостроении. Рига: Зинатне, 1969, с. 129—138.
227. Чулошников П. Л. Контактная сварка алюминиевых и магниевых сплавов.— В кн.: Справочник по сварке. М.: Машгиз, 1977, т. 4, с. 303—322.
228. Чулошников П. Л. Точечная и роликовая электросварка легированных сталей и сплавов.— М.: Машиностроение, 1974.— 231 с.
229. Чулошников П. Л., Нестеров Ю. В. Точечная сварка алюминиевых сплавов на конденсаторной машине.— Свароч. пр-во, 1964, № 6, с. 11—15.
230. Шагырин В. И., Рязанцев В. И. Клееварные конструкции.— М.: Машиностроение, 1981.— 168 с.
231. Шинкаренко Б. П., Ворона Д. С. А. с. 323219 (СССР). Пистолет для контактной точечной сварки.— Оpubл. в Б. И., 1972, № 1.

232. Шиккаренко Б. П., Ворона Д. С. А. с. 554111 (СССР). Пистолет для односторонней контактной точечной сварки.— Оpubл. в Б. И., 1977, № 14.
233. Шиккаренко Б. П., Ворона Д. С. А. с. 342744 (СССР). Ручной инструмент для контактной точечной сварки.— Оpubл. в Б. И., 1972, № 20.
234. Шиккаренко Б. П., Ворона Д. С. А. с. 356069 (СССР). Устройство для односторонней контактной точечной микросварки.— Оpubл. в Б. И., 1972, № 32.
235. Шиккаренко Б. П., Ворона Д. С., Кононец Б. И. А. с. 772766 (СССР). Механизм сжатия машины для контактной точечной сварки.— Оpubл. в Б. И., 1980, № 39.
236. Шиккаренко Б. П., Шелест Н. А., Ворона Д. С. А. с. 305971 (СССР). Механизм сжатия машины для контактной точечной сварки.— Оpubл. в Б. И., 1971, № 19.
237. Уилкинсон У. Получение тугоплавких металлов.— М.: Атомиздат, 1975.
238. Якобсон Е. Н. Исследование и разработка процесса и оборудования точечной контактной микросварки молибдена с никелем: Автореф. дис. ... канд. техн. наук.— М., 1978.— 21 с.
239. Каталоги на оборудование для контактной сварки фирм: Unitek, Hughes, Slee, Hirst, Spemby, Minitubes, ARO, Sciaky, Origin, OEW, Impulsphysic, PECO, Messer Griesheim PECO Electroschweißtechnik, Schlatter, Ultrapuls Schweißmaschinen, Resistronik A. E.
240. Оку Такэси. Конденсаторные машины для точечной сварки.— Кэйкиндзоку Эсацу Яп. Light Metal Weld, 1971, 9, N 103, p. 416—420.
241. Саго Такапори. (Ориджин данки к. к.). Пат. 49-12461 (Япония). Способ и оборудование для зарядки конденсаторов.— Оpubл. 25.03.74.
242. Тамаи Сэйитиро. Пат. 55-43961 (Япония). Измерение напряжения между сварочными электродами.— Оpubл. 17.11.81.
243. Фукуяма Куньо. Точечная сварка резонатора часов.— Дзидока Гидзюцу, Mech. Automat., 1975, 7, N 10, p. 58—59.
244. Alberti H., Frungel F. Das Widerstandsstandschweißen mittels transformierter Kondensatorentladung.— Blech, 1964, N 9, S. 678—685.
245. Allen G., Wettstein I. RW: microweld details set for polaris units.— Weld. Eng., 1963, 48, N 3, p. 42—45.
246. Axtell H. B., Ringer R. Z. Capacitive stored energy systems of spot welding.— Weld. J., 1941, 2, p. 117—122.
247. Babat G. I. High voltage condenser welding.— Amer. Weld. Soc. J., 1935, N 8, S. 6—8.
248. Batshevarov S. Technologie und Vorrichtungen zum Kondensatorimpulschweißen von Kleinteilen-puls.— Schweisstechnik B, 1973, 23, N 9, S. 413—415.
249. Deitz T. W., Stein C. M. Design and measurements of capacitor discharge welding transformers.— Electr. Eng., 1946, 65, N 3, p. 35—39.
250. Dostoomian A. S., Richard A. A., Traub A. C., Vonzetti R. Пат. 4359622 (США). Infrared and computer systems, Inc./ Оpubл. 16.11.82.
251. Echtermeyer F. Anwendung den Kondensator-Impulsschweißmaschine ZIS 255 in der Rundfunk- und Fernseherfertigung.— Schweisstechnik (DDR), 1963, 13, N 10, S. 438—440.
252. Echtermeyer F. Bisher in ZIS entwickelte Kondensator-Impulsschweißmaschinen und ihre Einsatzmöglichkeiten in der Industrie.— ZIS-Mitt., 1964, 6, N 6, S. 988—997.
253. Echtermeyer F. Weiterentwicklung der Kondensator-Impulsschweißmaschinen ZIS 294 und ZIS 295.— Ibid., 1965, 7, N 11, S. 1623—1637.
254. Ellern F. Capacity charging circuits for space systems using silicon controlled rectifiers.— IEEE Trans. Aerospace, 1964, N 2, p. 505—508.
255. Friess R. G., Hougen T. Пат. 3604888 (США). Weld control circuit.— Оpubл. 14.09.71.
256. Frungel F. Das Kondensator-Impulsschweißen.— Schweiss. und Schneid., 1960, 12, Ht 1, S. 14—18.
257. Frungel F., Knutel H. Kurzzeitschweißen mit transfermierter Kondensatorentladung.— Ibid., 1965, 17, N 9, S. 503—504.
258. Fruengel F. A., Patzke H. G. Ultra pulse welding, precision welding methods with short pulse energy.— Adv. Weld. Proc., 1974, 1, p. 194—206.

259. *Gossling M.* Zur Anwendung des Kondensator-Impulsschweißens bei Kreuzdrahtschweißverbindungen.— *Draht-Welt*, 1971, 57, N 4, S. 168—182.
260. *Improvements relating to electrical pressure-welding machines.* Пат. 806435 (Япония).— Оубл. 17.02.56.
261. *Klemperer H.* Capacitor-discharge welding systems.— *Electronics*, 1944, N 5, p. 11—13.
262. *Kondensatormaschine TKM-14 für das Widerstandspunktschweissen.*— *Schweißtechnik B*, 1971, 21, N 8, S. 376.
263. *Kondensator-Impulsschweißmaschine.*— *Blech. Maschinenkunde*, 1962, 9, N 9, 111/E1.
264. *Koshinz E. F.* The world of resistance welding.— *Weld. Des. and Fabr.*, 1972, 45, N 4, p. 76—79.
265. *Mathieu M.* Spot welders utilising condensers.— *Weld. J.*, 1940, N 2, p. 65.
266. *Meador C.* CD stud welding can be justified.— *Sub-Assem. Compon. Fast*, 1972, 10, N 5, p. 32.
267. *Medal M.* Kondenzatorove elektricke svaranie — Zvaranie, 1963, 12, N 8, s. 223—226.
268. *Mescheryak S. N., Stenkovsky E. P., Pentegov I. V. et al.* Пат. 3.644699 (США). Condenser spot — welding machine.— Оубл. 22.02.72.
269. *Mirchandani I. T., Deshmukh K. N.* Capacitor discharge welding and its applications.— *Indian and East Eng.*, 1977, 119, N 2, p. 71—74.
270. *Moravsky V. E., Vorona D. S., Shinkarenko B. P.* Пат. 3.671.708 (США). Apparatus for electrical contact spot welding preferably of small-size parts.— Оубл. 20.06.72.
271. *Moravsky V. E., Vorona D. S., Shinkarenko B. P.* Пат. 2.024.706 (Франция). Dispositif pour le sondage par points, principalement de petites pieces.— Оубл. 17.08.70.
272. *Moravsky V. E., Vorona D. S., Schinkarenko B. P.* Пат. 1.285.359 (Великобритания). Spot welding apparatus.— Оубл. 16.08.72.
273. *Moravsky V. E., Vorona D. S., Schinkarenko B. P.* Пат. 764523 (Япония). Spot welding apparatus.— Оубл. 4.10.74.
274. *Pentegov I. V., Stenkovsky E. P., Mescheryak S. N. et al.* Пат. 3895211 (США). Electrostatic welding apparatus.— Оубл. 15.07.75.
275. *Pulsonic welding. The development of a new joining technique.*— *Weld. and Metal Fabr.*, 1962, 30, N 6, p. 235.
276. *Rauscher R.* Automatisch auslosenden Punktschweiß.— *Neuerervorschlag* 151/65.— *ZIS-Mitt.*, 1966, 8, N 7, S. 967—968.
277. *Schweißverbindungen für vorbeschichtete Bleche.*— *Schweiz. Maschinenmarkt.*, 1978, 78, N 42, S. 48—51.
278. *Schweißen von Kleinteilen Dienst Hans.*— *Ibid.*, 1983, 83, N 12, S. 72—73.
279. *Taran J. M., Vorona D. S.* Пат. 1.259.988 (Великобритания). Method and apparatus for detecting the expulsion of molten metal in resistance welding.— Оубл. 12.07.72.
280. *Taran J. M., Vorona D. S.* Пат. 3.591.764 (США). Method of checking metal expulsion in resistance welding.— Оубл. 6.07.71.
281. *Taran J. M., Vorona D. S.* Пат. 47-49976 (Япония). Method of checking metal expulsion in resistance welding.— Оубл. 15.12.72.
282. *Taran J. M., Vorona D. S.* Пат. 6.900.935 (Франция). Procédé de controle des crachements, de metal lors du soudage par resistance, et dispositifs pour sa mise en ocuvre.— Оубл. 05.10.70.
283. *Theron M.* Soudure electrique par decharge de condensateurs.— *Matér et techn.*, 1974, 62, N 4/5, p. 211—214.
284. *Une nouvelle gamme de machines a souder a decharge de condensateurs.*— *Cah. Zanguepin*, 1972, N 19, p. 12—13.
285. *Ultrapuls-Schweißmaschinen.*— *VDI — Z. und Fertig.*, 1974, 64, N 11, S. 693.
286. *Vernon C. W. J.* Microwelding development.— *Weld. and Metal. Fabr.*, 1964, 32, N 9, S. 326—334.
287. *Widerstandsschweißgerät mit Kondensatorentladung.*— *Maschinenmarkt*, 1978, 84, N 90, S. 1775.
288. *Wodara J., Wendler H. D.* Schweißen mit Kondensatorentladung.— *Schweißtechnik (DDR)*, 1961, 11, N 5, S. 203—205,

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	5
ГЛАВА I. КОНДЕНСАТОРНАЯ СВАРКА — ПРОГРЕССИВНЫЙ МЕТОД СОЕДИНЕНИЯ МЕТАЛЛОВ	7
1. Сущность и способы	7
2. Основные преимущества конденсаторной сварки.	14
ГЛАВА II. ОСНОВЫ ПРОЦЕССА КОНДЕНСАТОРНОЙ СВАРКИ СОПРОТИВЛЕНИЕМ	17
1. Зарядка конденсаторов	17
2. Разряд конденсаторов	20
3. Контактные и собственные сопротивления зоны сварки	24
4. Нагрев металла при точечной и рельефной сварке	29
5. Полярные явления	37
ГЛАВА III. СТАБИЛЬНОСТЬ ТОЧЕЧНОЙ И РЕЛЬЕФНОЙ КОН- ДЕНСАТОРНОЙ СВАРКИ	40
1. Основные условия стабильности	40
2. Факторы, влияющие на изменения тепла, необходимого для образования точки при микросварке	43
3. Факторы, влияющие на изменения тепла, выделяющегося в зоне микросварки	48
4. Подогрев свариваемых деталей	63
ГЛАВА IV. СВАРИВАЕМОСТЬ РАЗЛИЧНЫХ МЕТАЛЛОВ ПРИ ТО- ЧЕЧНОЙ И РЕЛЬЕФНОЙ КОНДЕНСАТОРНОЙ СВАРКЕ	81
1. Особенности свариваемости и методика исследований	81
2. Основные процессы, протекающие в зоне сварки	90
3. Процессы в зоне термического влияния	95
4. Медь и ее сплавы	96
5. Алюминий, магниевые и их сплавы	100
6. Никель и его сплавы	103
7. Низкоуглеродистые, коррозионно-стойкие и другие стали	104
8. Химически активные и тугоплавкие металлы и их сплавы	106
9. благородные металлы и их сплавы	108
10. Разнородные металлы и сплавы	109

Г Л А В А V. ТЕХНОЛОГИЯ ТОЧЕЧНОЙ И РЕЛЬЕФНОЙ КОНДЕНСАТОРНОЙ СВАРКИ	113
1. Основные характеристики сварных соединений	113
2. Рациональные циклы сварки	117
3. Регулирование электрических параметров сварки, подогрева и термообработки	120
4. Влияние основных параметров процесса на качество сварных соединений	124
5. Выбор режимов сварки	130
6. Схемы сварки и основные типы сварных соединений	137
7. Подготовка поверхности свариваемых деталей	145
8. Микросварка однородных металлов	147
9. Микросварка разнородных металлов	163
10. Точечная сварка металлов толщиной 0,8—3,0 мм	174
11. Рельефная сварка	181
Г Л А В А VI. ЭЛЕКТРОДЫ И МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ИХ ИЗГОТОВЛЕНИЯ	187
1. Электроды для точечной и рельефной сварки	187
2. Охлаждение и зачистка электродов	194
3. Материалы для электродов	196
Г Л А В А VII. ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ТОЧЕЧНОЙ И РЕЛЬЕФНОЙ КОНДЕНСАТОРНОЙ СВАРКИ	201
1. Классификация и основные узлы оборудования	201
2. Электрические устройства	202
3. Механические устройства	213
4. Основные характеристики оборудования	233
Г Л А В А VIII. ОСНОВНЫЕ ВОПРОСЫ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ ТОЧЕЧНОЙ И РЕЛЬЕФНОЙ КОНДЕНСАТОРНОЙ СВАРКИ	244
1. Выбор рабочей батареи конденсаторов	244
2. Особенности расчета сварочного трансформатора	247
3. Рекомендации по проектированию других узлов	255
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	258

**Владислав Эдуардович
МОРАВСКИЙ**
**Давид Семенович
ВОРОНА**

**ТЕХНОЛОГИЯ
И ОБОРУДОВАНИЕ
ДЛЯ ТОЧЕЧНОЙ
И РЕЛЬЕФНОЙ
КОНДЕНСАТОРНОЙ
СВАРКИ**

*Утверждено к печати ученым советом
Института электросварки
им. Е. О. Патона АН УССР*

Редактор Н. К. Сытчик
Художественный редактор И. Т. Лагутин
Технический редактор Г. М. Ковалева
Корректоры Л. С. Трилевич,
Л. Я. Постолова, Т. Я. Чорная,
И. В. Точаненко

Информ. бланк № 7043

Сдано в набор 07.02.85. Подп. в печ. 06.08.85. БФ 01108.
Формат 60 × 90/16. Бум. тип. № 1. Обычн. нов. гарн. Выс.
печ. Усл. печ. л. 17,0. Уел. кр.-отт. 17,56. Уч.-взд. л. 18,6.
Тираж 1900 экз. Заказ 5-360 Цена 3 р. 30 к.

Издательство «Наукова думка». 252601 Киев 4, ул. Репина, 3.
Отпечатано с матриц Головного предприятия рес-
публиканского производственного объединения «Поли-
графнига». 252057, Киев, ул. Довженко, 3 на книжной
фабрике «Коммунист». 310012, Харьков 12, ул. Энгельса,
11.