

**А. К. НИКОЛАЕВ
В. М. РОЗЕНБЕРГ**

СПЛАВЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОДОВ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ



**А. К. НИКОЛАЕВ,
В. М. РОЗЕНБЕРГ**

СПЛАВЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОДОВ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ



**МОСКВА
«МЕТАЛЛУРГИЯ» 1978**



УДК 669.35

Рецензент: *инж. В. Г. Егоров*

УДК 669.35

Сплавы для электродов контактной сварки. Николаев А. К., Розенберг В. М. М., «Металлургия», 1978, 96 с.

В книге рассмотрены требования, предъявляемые к электродам контактной сварки и электродным сплавам в зависимости от свариваемого материала (углеродистые, нержавеющие стали, легкие сплавы), методов изготовления полуфабрикатов и электродов, условий сварки. Изложены основные принципы легирования электродных сплавов, приведены режимы их термической и термомеханической обработки, физические, механические и эксплуатационные свойства основных промышленных электродных сплавов и сведения о корреляции между этими свойствами. Рассмотрены перспективы создания новых сплавов и оптимизации режимов их обработки.

Книга рассчитана на широкий круг инженерно-технических работников металлургических и машиностроительных заводов, научно-исследовательских и проектно-конструкторских организаций, а также может быть полезна студентам высших учебных заведений и аспирантам, специализирующимся в области жаропрочных сплавов и сварки. Ил. 38. Табл. 12. Список лит.: 47 назв.

© Издательство «Металлургия», 1978

Н $\frac{31206-121}{040(01)-78}$ 101-78

ОГЛАВЛЕНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ	4
ВВЕДЕНИЕ	5
ГЛАВА I. Электроды — сменная, быстроизнашивающаяся часть электросварочных машин	7
1. Условия работы, основные типы электродов и требования, предъявляемые к ним	7
2. Критерии оценки стойкости электродов	11
3. Расчет стойкости электродов при контактной сварке сталей	13
ГЛАВА II. Сплавы для электродов контактной сварки	16
1. Медь — основа электродного сплава	17
2. Низколегированные медные сплавы. Основные принципы легирования, особенности состава, структуры, свойств	22
3. Корреляция между стойкостью электродов и физическими и механическими свойствами электродных сплавов	42
Изменение структуры электродов в процессе эксплуатации	48
Связь стойкости электродов с ползучестью электродного сплава	51
4. Выбор электродного сплава в зависимости от метода и параметров сварки, свариваемого материала	53
Точечная сварка	54
Шовная сварка	57
Рельефная сварка	57
Стыковая сварка	58
ГЛАВА III. Технология изготовления полуфабрикатов из электродных сплавов и электродов	58
1. Плавка сплавов, литье слитков и электродов	60
2. Обработка давлением	67
3. Термическая обработка	70
4. Влияние состава сплава и параметров технологии изготовления полуфабрикатов на работоспособность электродов	73
ГЛАВА IV. Перспективы разработки и применения в промышленности новых электродных сплавов, оптимизации режимов их обработки	78
ГЛАВА V. Экономическая эффективность в результате оптимизации и унификации составов электродных сплавов и методов изготовления электродов	84
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	
ПРИЛОЖЕНИЕ. Физические и механические свойства основных электродных сплавов	91
1. Серебряная бронза БрСр (91). 2. Кадмиевая бронза БрКд (91) 3. Хромовая бронза БрХ (91). 4. Хромоциркониевая бронза БрХЦр (92). 5. Хромованадийциркониевая бронза БрХВЦр (92). 6. Кобальтбериллиевая бронза БрКБ (92). 7. Никельбериллиевая бронза БрНБТ (93). 8. Кобальткремниевая бронза БрКХК (93). 9. Никелькремниевая бронза БрНХК (93).	

ПРЕДИСЛОВИЕ

Эффективность контактной сварки определяется работоспособностью электродов — сменного быстроизнашивающегося инструмента контактных сварочных машин. Материал для электродов следует выбирать с учетом металлургических и металловедческих факторов, а также принимать во внимание специфику технологии сварки. Цель этой книги — помочь специалистам, использующим в производстве изделий контактную сварку, оценить с металлургических и металловедческих позиций применяемые ими электроды и найти наиболее рациональный способ повышения качества и эффективности сварки. Это необходимо, так как многие предприятия самостоятельно выбирают сплавы для электродов, методы их обработки и способы изготовления.

В книге использованы результаты работ П. Л. Чулошникова, С. К. Слиозберга, С. И. Кутковского, Д. Г. Бутомы, А. П. Смирягина, М. В. Захарова, М. В. Степаиовой, Я. Ф. Шабашова, Н. П. Белоусова, Л. Н. Сергеева, М. М. Фишкиса, В. Я. Клиншова, К. К. Билева и др., которые внесли значительный вклад в решение проблемы выбора электродов и электродных сплавов в стране; данные зарубежных фирм, выпускающих и применяющих электроды контактной сварки, а также результаты исследований электродных сплавов, проводимых в течение ряда лет в институте «Гипроцветметобработка» авторами.

Вследствие небольшого объема книга не освещает все аспекты проблемы электродов контактной сварки, особенно относительно электродов для шовной, рельефной и стыковой сварки. Она явится дополнением к таким известным монографиям, как «Электроды для контактной сварки» С. К. Слиозберга и П. Л. Чулошникова, а также «Точечная и роликовая электросварка легированных сталей и сплавов» П. Л. Чулошникова.

Авторы выражают глубокую признательность С. К. Слиозбергу, Ф. С. Новикву, И. Г. Романовой, А. И. Новикову, Н. И. Ревинной, И. Ф. Пружинину, Д. К. Фигуровскому, М. Д. Теплицкому, Н. Н. Лупановой, которые оказали помощь в планировании, проведении и обработке результатов экспериментов, представленных в данной книге.

ВВЕДЕНИЕ

XXV съездом КПСС поставлена задача интенсификации производства, существенного повышения производительности труда и качества продукции.

Развитие металлургии, всех видов машиностроения и приборостроения во многом связано с использованием прогрессивных способов сварки, в частности контактной.

Контактная (точечная, шовная, рельефная, стыковая) электросварка широко распространена в металлургии (производство труб, сварка полос, лент, прутков и проволоки при прокатке и волочении длинномерных полуфабрикатов), машиностроении, приборостроении, радиотехнике и самолетостроении (соединение различных деталей и узлов тонколистовых конструкций). Контактная электросварка значительно влияет на производительность труда, выход годного (металлургия), а при производстве автомобилей, самолетов, железнодорожных вагонов, сельскохозяйственной техники, радиотехники, приборов, предметов широкого потребления является наиболее целесообразным и экономичным, а иногда и единственно возможным способом соединения металлических конструкций. Например, современный грузовой автомобиль имеет более 2000, а легковой — около 10000 сварных точек.

Производительность процесса сварки, качество и надежность сварного соединения в большой степени определяются качеством электродов, работающих в сложных условиях температурного и механического воздействий.

Под действием температуры и напряжений изменяется форма рабочей части электродов, а следовательно, размеры литого ядра сварного соединения, его качество и прочность. Поэтому необходимы зачистка, переточка или замена электродов, что при высоком темпе работы современной сварочной машины существенно влияет на производительность труда.

При сварке 1000 комплектов кузовов и других деталей легкового автомобиля расходуется более 200 кг электродных материалов. Еще больше удельный расход электродов при сварке изделий из легких сплавов, когда качество сварки определяется не только прочностью сварного соединения, зависящей, в частности,

от формы рабочего конца электрода, но и отсутствием переноса материала электрода на поверхность свариваемой детали.

Существует несколько десятков эффективных электродных сплавов, используемых в сварочных машинах. Однако нередко для электродов используют медь различных марок или медные сплавы, работоспособность которых при контактной сварке значительно ниже специально выбранных сплавов для каждого конкретного случая сварки. При выборе сплава для электродов не всегда учитывают свариваемый материал, а также состояние полуфабрикатов, из которых изготавливают электроды. Все это наряду с составом сплавов существенно влияет на работоспособность электродов, определяемую конструкцией, точностью и чистотой изготовления электрода, составом свариваемого материала, толщиной свариваемого изделия и чистотой его поверхности, режимом сварки, составом, способом изготовления и режимом обработки электродного материала. Не умаляя влияния каждого из перечисленных факторов на эффективность процесса сварки и ее качество, следует отметить, что первостепенное значение имеют материал электрода, состояние, в котором его применяют, а также способ его изготовления.

При рассмотрении эксплуатационных свойств электродов обычно применяют такие термины, как стойкость, долговечность, работоспособность. Общепринятого определения этих понятий до настоящего времени нет.

Под стойкостью электродов следует понимать их способность сохранять геометрические размеры в процессе эксплуатации; долговечность характеризует полный ресурс нормальной эксплуатации электрода; работоспособность — это общее понятие, соединяющее в себе первые два, а также такие показатели, как взаимодействие материала электрода со свариваемым материалом и трещинообразование на рабочей поверхности электрода.

ЭЛЕКТРОДЫ — СМЕННАЯ, БЫСТРОИЗНАШИВАЮЩАЯСЯ ЧАСТЬ ЭЛЕКТРОСВАРОЧНЫХ МАШИН

Контактную электросварку — точечную, шовную, рельефную, стыковую — применяют для получения неразъемного соединения в изделиях (главным образом тонколистовых), изготавливаемых из различных металлических материалов: низко- и среднелегированной стали, нержавеющей стали, сплавов на медной и никелевой основах, сплавов на основе благородных металлов, легких сплавов и т. д.

Контактная сварка (сварка сопротивлением) основана на эффекте нагрева свариваемых деталей до плавления в месте их соединения. Этот нагрев осуществляется за счет теплоты, выделяемой электрическим током в короткозамкнутом контуре. Необходимым условием для осуществления процесса сварки является более высокое электросопротивление на границе свариваемых частей изделия в месте их контакта, т. е. в месте будущей сварки, по сравнению с электросопротивлением на границе свариваемая деталь — токоподводящая часть сварочной машины (рис. 1).

Нарушение этого основного принципа приводит к снижению качества сварки (отклонению формы литого ядра от оптимальной), смещению теплового центра в область, прилегающую непосредственно к токоподводящей части сварочного агрегата. В результате свариваемые детали привариваются к сварочному агрегату.

Роль токоподводящей части сварочной машины выполняют элект-

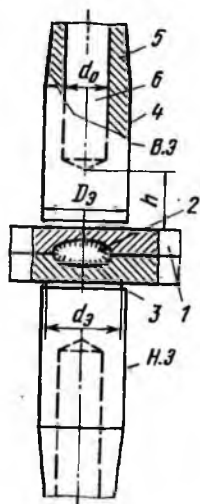
Рис. 1. Схема контактной сварки:

1 — свариваемые детали; 2 — литое ядро; 3 — рабочая часть электрода; 4 — средняя часть электрода; 5 — посадочный конус электрода; 6 — канал охлаждения электрода; В.Э. — верхний электрод; Н.Э. — нижний электрод

роды, являющиеся ее рабочим инструментом и имеющие основное значение для осуществления самого процесса сварки.

1. УСЛОВИЯ РАБОТЫ, ОСНОВНЫЕ ТИПЫ ЭЛЕКТРОДОВ И ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К НИМ

Электроды независимо от типа контактной сварки выполняют следующие три основные функции: сжимают детали, подводят к сва-



риваемым деталям электрический ток и отводят тепло, выделяющееся в деталях в процессе их сварки. В случае шовной сварки электроды-ролики еще и перемещают свариваемые детали. Таким образом, электроды работают в сложных условиях теплового и механического воздействия. Учитывая периодический режим процесса сварки, следует отметить, что электроды работают в условиях термоциклирования. В зависимости от марки свариваемого материала, его толщины, типа и параметров сварки, условий охлаждения электродов на их рабочем конце могут развиваться температуры до 600—700°C и удельные давления до 30—40 кгс/мм².

На основании изложенного можно сформулировать требования, которые предъявляют к электродам контактной сварки: высокая электропроводность, позволяющая пропускать электрический ток большой плотности без нагрева электрода (при этом чем выше электропроводность свариваемого материала, тем выше должна быть электропроводность электродов); высокие механические свойства в широком интервале температур, необходимые для восприятия без деформации больших и неоднократно повторяющихся усилий сжатия; высокая сопротивляемость износу при трении; высокая теплопроводность, обеспечивающая быстрый отвод тепла из зоны сварки; неспособность сплавляться со свариваемым материалом в процессе сварочного импульса при повышенных температурах, возникающих на границе свариваемая деталь — электрод; высокая коррозионная стойкость и жаростойкость (окалиностойкость); достаточно низкая стоимость, с тем чтобы процесс сварки был рентабельным; возможно более простая конструкция.

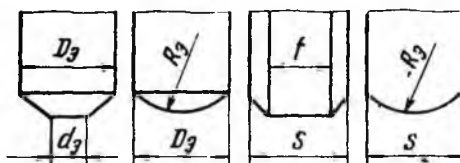
Как видно из сформулированных выше требований, работоспособность электродов во многом определяется свойствами материалов, из которых они изготовлены. Вместе с тем значительную роль в повышении долговечности электродов, их работоспособности и эффективности играет конструкция электродов, конструкция узла электрод—электрододержатель, способ изготовления электродов. Действительно, такой важнейший фактор, как температура рабочего конца электрода и электрода в целом, будет зависеть, например, от интенсивности его охлаждения. В этой связи можно сформулировать основные требования, предъявляемые к конструкции электродов, которые на основании обобщения данных работ [1—3] и ГОСТ 14111—67 в общем виде сводятся к следующему (см. рис. 1): 1) диаметр средней части электрода D_3 определяется из соотношения $D_3 = (0,4—0,6) \sqrt{F_3}$, где F_3 — максимальное усилие на электроды машины. Практически допустимое усилие сжатия электродов $F_3 \leq (4—5) D_3^2$; 2) диаметр канала охлаждения электрода d_0 связан с диаметром электрода D_3 соотношением $d_0 = (0,5—0,6) D_3$, а расстояние от рабочего конца электрода до канала охлаждения h — соотношением $h = (0,75—0,8) D_3$; 3) конусность посадочной части электродов диаметром меньше 25 мм принимают равной 1:10; для электродов диаметром более 25 мм конусность равна 1:5.

Кроме того, долговечность электродов существенно зависит от соотношения основных размеров электрода и толщины свариваемого материала (табл. 1), конструкции и материала электрода и марок свариваемого материала (низкоуглеродистые, нержавеющие стали, легкие сплавы и т. д.), качества поверхности свариваемой детали и чистоты обработки рабочей части электрода, параметров сварки (температура сварки, усилие сжатия электродов, электрические па-

раметры, длительность сварочного импульса), качества соединения электрод—электрододержатель и некоторых других факторов. Например, контактирующие поверхности электрода и электрододержателя должны быть обработаны с точностью, соответствующей 7-му классу, не иметь даже следов окисления, смазки и других загрязнений. Это определяет герметичность соединения, качественность электрического контакта. В зависимости, например, от темпа сварки находятся температурные параметры электрода (температура всего электрода, температура его рабочего конца), что в свою очередь определяет необходимый уровень физических и механических свойств электродного материала, ответственных за работоспособность электрода.

ТАБЛИЦА 1

**ОСНОВНЫЕ РАЗМЕРЫ РАБОЧЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ЭЛЕКТРОДОВ
ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ ТОЛЩИН СВАРИВАЕМОГО МАТЕРИАЛА [1, 2]
(РЕКОМЕНДУЕМЫЕ ОПТИМАЛЬНЫЕ РАЗМЕРЫ, ММ)**



Толщина сварива- емых матери- алов, мм	Углеродистые, нержавеющие, жаро- прочные стали и сплавы					Алюминиевые, магни- евые и медные спла- вы		
	D_3	d_3	R_3	S	f	D_3	S	R_3
0,3	12	3	15—25	6	3	12	12	25
0,5	12	4	25—50	6	4	16	16	50
0,8	12	5	50—75	10	5	16	16	50—75
1,0	12	5	75—100	10	5	16	16	75
1,2	16	6	75—100	12	6	16	16	75
1,5	16	7	100—150	12	7	20	20	75—100
2,0	20	8	100—150	15	8	20	20	100
2,5	20	9	150—200	18	9	25	25	100
3,0	25	10	150—200	20	10	25	25	100
3,5	25	11	200—250	22	11	25	25	150
4,0	25	12	200—250	24	11	32	32	200

Независимо от типа электрод имеет рабочую часть, которая обеспечивает непосредственный контакт сварочной машины со свариваемым изделием, среднюю часть и конусную (резьбовую) посадочную часть, посредством которой электрод через электрододержатель соединен со сварочной машиной (см. рис. 1, 2).

Рабочая часть электрода чаще всего имеет плоскую (цилиндрическую у роликов) или сферическую поверхность и, как это видно из данных, приведенных в табл. 1, определяется диаметром d_3 , ра-

диусом сферы R_0 и шириной f (у роликов шовной сварки). Характеристикой рабочей части роликов является также диаметр ролика, так как от этой величины зависит площадь контакта ролик — свариваемая деталь. Электроды со сферической рабочей поверхностью менее чувствительны к перекосам осей электродов при их установке, чем электроды с плоской рабочей поверхностью. Поэтому их чаще всего следует использовать на подвесных сварочных машинах.

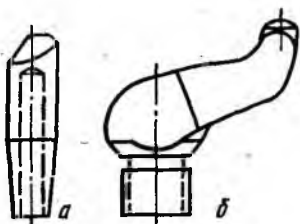


Рис. 2. Прямой (а) и фигурный (б) электроды

Средняя часть электрода соединяет рабочую и посадочную его части и определяется диаметром D_0 (у роликов шовной сварки — толщиной S). В зависимости от конфигурации средней части электроды подразделяются на прямые и фигурные (см. рис. 2). К фигурным относятся электроды, у которых ось, проходящая через центр рабочей поверхности, значительно смещена относительно оси посадочной части. С этой точки зрения фигурные электроды следует отличать от прямых, выполненных с отклонением от симметричного расположения рабочей поверхности (см. рис. 2, а). В зависимости от сложности свариваемой конструкции соотношение используемых прямых и фигурных электродов может существенно изменяться. Например, в автомобильной промышленности количество фигурных электродов приблизительно составляет 10—20% от общего количества применяемых электродов, хотя по номенклатуре электродов это соотношение будет иным. В других же отраслях промышленности при производстве более сложных конструкций с применением фигурных электродов выполняют до 60—70% сварных соединений.

Естественно, что изготовить фигурный электрод стабильного качества значительно сложнее, чем прямой. Поэтому в тех случаях, когда для осуществления доступа рабочей части электрода к месту сварки деталей необходимо отступление от прямолинейной формы, значительно рациональнее применять фигурный электрододержатель, чем фигурный электрод (рис. 3). Тогда роль электрода может играть сменный «колпачок», представляющий собой по существу несколько удлиненную рабочую часть электрода. Преимущество такой пары очевидно: во-первых, срок службы электрододержателя значительно больше, чем электрода, а значит, более рентабельным становится его изготовление с учетом всех требований, необходимых для создания наилучших условий охлаждения; во-вторых, как будет показано дальше, при изготовлении электродов методом штамповки очень важно, с точки зрения формирования необходимой структуры материала рабочего конца, сокращение его длины (уменьшение габаритов заготовки). Правда, в этом случае требования к механическим свойствам материала электрододержателя существенно возрастают. Но, если учитывать температурные параметры работы электрододержателя и величину контактной поверхности электрод — электрододержатель, решить эту проблему не очень сложно. Больше того, в настоящее время становится ясным, что во всех случаях (и для прямых электродов тоже) электрододержатели следует готовить не из меди, а из медных сплавов, значительно увеличивая этим их долговечность.

И наконец, последний тип электродов — специальные электроды. К этому типу можно отнести электроды со сложным рельефом рабочей поверхности, электроды — панги, применяемые при роликовой сварке мелких деталей, самоустанавливающиеся поворотные электроды со сферической опорой (рис. 4) и некоторые другие. Специальные электроды менее распространены, чем прямые или фигурные. Однако применение их в ряде случаев является необходимым. Например, применение самоустанавливающихся электродов необходимо в случае сварки деталей, поверхность которых имеет уклон. Только в этом случае выполняется одно из основных требований качественной сварки — перпендикулярность осей электродов поверхности свариваемых изделий.

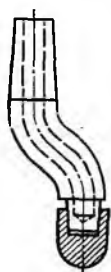


Рис. 3. Узел — фигурный электрододержатель — электрод колпачкового типа

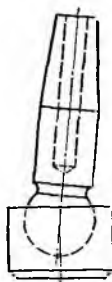


Рис. 4. Специальный самоустанавливающийся электрод

Таким образом, контактная сварка, являясь одним из наиболее эффективных и рациональных методов получения неразъемного соединения деталей и узлов конструкций, во многом зависит от качества электрода, т. е. материала, из которого он изготовлен, конструкции (типа, формы рабочей поверхности, условий охлаждения), метода и чистоты его изготовления, а также от марки свариваемого материала, качества поверхности свариваемой детали и ее габаритов, параметров сварки.

2. КРИТЕРИИ ОЦЕНКИ СТОЙКОСТИ ЭЛЕКТРОДОВ

Качество электрода любого типа контактной сварки определяется его стойкостью, т. е. способностью сохранять в определенных пределах исходные размеры и форму рабочей поверхности. В конечном счете, от формы и размеров рабочей части электродов зависит качество сварного соединения. Износ рабочей части электродов и связанное с этим увеличение площади контакта электрода — свариваемая деталь уменьшают плотности тока и давления в месте сварки и, как следствие этого, к изменению размеров литого ядра по сравнению с оптимальным (табл. 2), снижению прочности соединения и его качества, ухудшению внешнего вида свариваемой детали.

В соответствии с ГОСТ 14111—69, стойкость электродов оценивается минимальным числом качественно выполненных сварных точек до первой переточки (зачистки) электрода и числом сварных точек до его полного износа. Однако, учитывая огромное количество факторов, влияющих на работоспособность электродов, условность

ТАБЛИЦА 2

**ОПТИМАЛЬНЫЕ РАЗМЕРЫ СВАРНОГО СОЕДИНЕНИЯ В ЗАВИСИМОСТИ
ОТ ТОЛЩИНЫ СВАРИВАЕМЫХ ДЕТАЛЕЙ, ММ [1, 2]**

Толщина свариваемой детали	Диаметр литового ядра точечной	Ширина литой зоны роликовой сварки	Минимальное расстояние между соседними точками (шаг)		
			малоуглеродистая сталь	нержавеющая сталь, жаропрочные сплавы	медные сплавы
0,3	2,5—3,5	2,0—3,0	7	5	8
0,5	3,0—4,0	2,5—3,5	10	7	11
0,8	3,5—4,5	3,0—4,0	11	9	13
1,0	4,0—5,0	3,5—4,5	12	10	15
1,2	5,0—6,0	4,5—5,5	13	11	16
1,5	6,0—7,0	5,5—6,5	16	13	18
2,0	7,0—8,5	6,5—8,0	19	15	22
2,5	8,0—9,5	7,5—9,0	22	18	26
3,0	9,0—10,5	8,0—9,5	26	22	30
3,5	10,5—12,5	9,0—10,5	30	26	35
4,0	12,0—13,5	10,0—11,5	34	30	40

такой ее оценки очевидна. Тем не менее в ряде случаев оценка стойкости электродов все же необходима. Это требуется прежде всего при выборе или разработке оптимального состава электродного материала, типовых испытаниях электродов, связанных с аттестацией их качества, испытаниях новых конструкций электродов и в некоторых других случаях.

Чтобы исключить влияние как можно большего количества факторов и обеспечить требуемую объективность оценки работоспособности электрода, испытания обычно проводят на одной и той же сварочной машине, сваривая материал одной марки, одинаковой толщины и качества поверхности и задаваясь при этом вполне определенными параметрами сварки (температура сварки, энергетические параметры, давление на электроды, условия охлаждения). Испытания проводят на электродах точечной сварки с плоской рабочей поверхностью (чаще всего типа 0821—0113 по ГОСТ 14111—69) с построением графиков зависимости изменения ее размера от числа свариваемых точек. В настоящее время общепризнанным показателем стойкости считается количество точек, сваренных до увеличения диаметра исходной рабочей поверхности на 20%*, а если этого не происходит за заданное количество сварок, то общее увеличение диаметра при сварке 10000 точек [12]. Одновременно через каждые 500—1000 точек проводят испытания на прочность сварного соединения (испытания на разрыв). Прочность сварного соединения в процессе всего испытания должна соответствовать требуемой минимальной величине. Измерения рабочей поверхности электрода проводят по отпечатку на свинцовой пластинке через определенное количество сварок или по следу на белой бумаге через копироваль-

* Эта величина соответствует возможности уменьшения стабильной прочности сварного соединения ниже требуемого уровня.

ную. Если испытаниям подвергают электроды со сферической поверхностью, то изменение размеров рабочей поверхности фиксируется соответствующими шаблонами. В некоторых случаях при оценке стойкости электродов используют измерение изменения длины электрода. Однако объективно такой метод оценки менее точен, впрочем так же, как и измерения изменения диаметра рабочей части электрода по следу на бумаге (через копировальную).

Критерий оценки работоспособности электродов по увеличению диаметра их рабочей поверхности применим не для всех свариваемых материалов. При сварке большинства легких сплавов (на основе алюминия, магния, титана), некоторых деталей из благородных металлов (электрические контакты), материалов, используемых в электровакуумных приборах, этот критерий оценки стойкости электродов не может быть единственным. Как правило, задолго до изменения размера рабочей части электрода на контрольную величину на поверхности свариваемых деталей начинают появляться потемнения, свидетельствующие о начале интенсивного перехода материала электрода на деталь. Подобное загрязнение поверхности свариваемых деталей в ряде случаев недопустимо, так как может послужить источником местной коррозии или изменения параметров работы изделия¹. В связи с этим за критерий оценки работоспособности электродов при сварке таких материалов и изделий принимают число сварных точек до появления темного налета на поверхности изделия. Степень допустимого загрязнения поверхности изделия при сварке обычно устанавливают соответствующими эталонами.

3. РАСЧЕТ СТОЙКОСТИ ЭЛЕКТРОДОВ ПРИ КОНТАКТНОЙ СВАРКЕ СТАЛЕЙ

Экспериментальная зависимость изменения диаметра электрода контактной точечной сварки Δd от числа выполненных сварок n в большинстве случаев описывается кривой вполне определенного вида [2—6]. Как было показано, такая зависимость может служить критерием оценки стойкости электродов и является результатом проведения довольно длительных и трудоемких испытаний. Достаточно отметить, что для получения более или менее объективных результатов требуется испытать 10—20 пар электродов. Суммарная ошибка при этом, несмотря на принимаемые меры по ограничению влияния посторонних факторов, довольно велика. Относительная средняя остаточная дисперсия величины изменения диаметра электродов после выполнения 10000 сварок на углеродистой и нержавеющей сталях составляет 23—28%. С учетом ошибки эксперимента зависимость изменения диаметра электрода от числа сварок схематически можно представить областью, ширина которой увеличивается с увеличением длительности испытаний (рис. 5, заштрихованная область).

Представляет интерес решение задачи, связанной с упрощением испытаний и сокращением их длительности в результате прогнозирования изменения диаметра рабочей части электрода, например после 10000 сварок (Δd_{10000}) по изменению этого параметра после значительно меньшего количества сварок (500, 1000, 2000 и т. д.). Схе-

¹ Увеличение контактного сопротивления, испарение меди в процессе эксплуатации изделия и т. д.

ма такого расчета с помощью линейных уравнений (прямые линии внутри заштрихованной области) показана на рис. 5.

Практически выполнить расчет с приемлемой точностью можно лишь при условии достаточной корреляции между параметрами, входящими в формулу расчета. Корреляция между любыми двумя свойствами оценивается коэффициентом корреляции (r), который является мерой тесноты связи этих свойств и может меняться от 1

(функциональная связь) до 0 (отсутствие связи). В промежуточном случае коэффициент корреляции выражает ту долю вариации одной из переменных, которая связана с изменением значений другой. В данном случае наблюдается вероятностная зависимость, проявляющаяся в том, что с изменением количественных значений одной из переменных (независимо от свойств и единиц, в которых они измерены) изменяется вероятность появления различных количественных значений другой. Линейная связь между свойствами считается статистически значи-

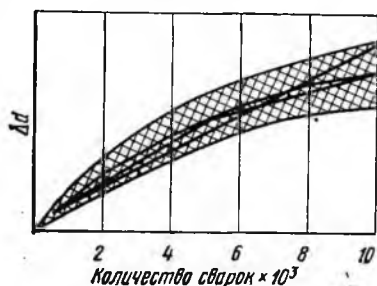


Рис. 5. Изменение рабочей части электродов Δd от числа сваренных точек (схема)

мой в случае, если $[r] \geq r_{кр}$, где $r_{кр}$ — критическое значение коэффициента корреляции для выбранного уровня значимости.

Для электродных сплавов корреляцию между свойствами, в том числе и изменениями диаметра рабочей части электродов после различного числа сварок, изучали на массиве, состоящем из 26 различных отечественных и зарубежных композиций низколегированных медных сплавов. В этом случае для доверительной вероятности 99,9% $r_{кр} = 0,61$. О корреляции между физическими, механическими и эксплуатационными свойствами электродных сплавов будет сказано дальше. В данном разделе приведены сведения об общей схеме расчета коэффициентов корреляции, коэффициентов регрессии на ЭВМ «Минск-32» (краткая блок-схема программы счета приведена ниже), а также конкретные данные по коэффициентам корреляции и относительным остаточным дисперсиям ($S_{ост}^{отн}$) расчетов изменения диаметра рабочего конца электродов после 10000 сварок, выполненных на различных сталях. Приведем эти данные:

КРАТКАЯ БЛОК-СХЕМА ПРОГРАММЫ

Подготовка исходных данных



Расчет Y_i, S_{Y_i}



$$\sum_{i=1}^N (Y_{1i} - \bar{Y}_1)(Y_{2i} - \bar{Y}_2)$$



$$r_{1-2} = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_{1i} - \bar{Y}_1) (\bar{Y}_{2i} - Y_{2i})}{N \cdot S_{y_1} \cdot S_{y_2}}$$

↓

Построение уравнений регрессии $Y_2 = a_1 + a_2 Y_1$

↓

$$a_1 = \bar{Y}_2 - r_{1-2} \frac{S_{y_2}}{S_{y_1}} \bar{Y}_1$$

↓

$$a_2 = r_{1-2} \frac{S_{y_2}}{S_{y_1}}$$

для стали 12ХН9Т

N , тыс. шт.	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
$S_{\text{ост}}^{\text{отн}}$, %	24,99	20,78	18,84	16,83	14,48	13,48
r	0,87	0,90	0,93	0,94	0,94	0,96

для стали 12ХН9Т

N , тыс. шт.	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0
$S_{\text{ост}}^{\text{отн}}$, %	11,46	10,40	9,08	7,70	5,63	5,40
r	0,97	0,99	0,99	1,00	1,00	1,00

для стали 08кп

N , тыс. шт.	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
$S_{\text{ост}}^{\text{отн}}$, %	21,26	16,19	14,18	13,94	13,45	12,38
r	0,88	0,90	0,93	0,93	0,93	0,93

для стали 08кп

N , тыс. шт.	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0
$S_{\text{ост}}^{\text{отн}}$, %	10,92	9,27	8,21	6,79	5,40	2,77
r	0,94	0,96	0,97	0,98	0,99	1,00

Уравнение для расчета стойкости электродов в общем виде представляет собой следующее выражение:

$$\Delta d_{10000} = a_1 + a_2 \Delta d_n,$$

где Δd_{10000} — изменение диаметра рабочей поверхности электрода, которое произошло за 10000 сварок, мм; Δd_n — изменение диаметра рабочей поверхности электрода после выполнения n сварок, мм ($n=500, 1000, 1500, 2000$ и т. д.); a_1 и a_2 — коэффициенты регрессии.

Коэффициенты регрессии уравнений для расчета изменения диаметра рабочей поверхности электродов после 10000 сварок по этому параметру для меньшего количества сварок приведены в табл. 3.

ТАБЛИЦА 3

**КОЭФФИЦИЕНТЫ РЕГРЕССИИ УРАВНЕНИЙ ДЛЯ РАСЧЕТА
СТОЙКОСТИ ЭЛЕКТРОДОВ**

n^*	a_1	a_2	a_1	a_2
Сталь 08кп			Сталь 12Х18Н9Т	
500	0,915	2,408	0,646	3,024
1000	0,882	2,179	0,595	2,281
1500	0,806	1,770	0,468	2,091
2000	0,734	1,607	0,424	1,895
2500	0,652	1,485	0,393	1,717
3000	0,572	1,395	0,270	1,687
4000	0,451	1,323	0,120	1,636
5000	0,320	1,276	0,009	1,538
6000	0,192	1,231	—0,032	1,391
7000	0,164	1,157	—0,013	1,272
8000	0,084	1,092	0,048	1,156
9000	0,020	1,053	0,037	1,073

* Количество сварок, после выполнения которых измеряли Δd_n .

Анализ экспериментальных и рассчитанных значений стойкости электродов показал их вполне удовлетворительное соответствие. Ориентируясь при расчете стойкости электродов на приведенные эмпирические уравнения, следует иметь в виду то обстоятельство, что они характеризуют зависимость, которая является средней для большого количества сплавов. В их числе были и такие, которые по стойкости явно не подходили для данного случая сварки (медь, сплавы меди с серебром, кадмием, магнием и др.) и тем самым вносили наибольший вклад в ошибку расчета. Но даже в этом случае результаты были удовлетворительными. Проведенная работа показывает, что при стендовых и контрольных испытаниях электродов достаточно ориентироваться на сравнительно малый ресурс испытаний (например, 500 сварок), а затем в результате соответствующих расчетов прогнозировать их работоспособность. Точность таких расчетов может значительно возрасти, если ограничиться несколькими осваиваемыми промышленностью сплавами и внести соответствующую корректировку в коэффициенты регрессии уравнений.

ГЛАВА II

СПЛАВЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОДОВ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

Рассмотренные ранее требования, предъявляемые к электродам контактной сварки, связаны в основном с материалом, из которого они изготовлены. Такие свойства, как тепло- и электропроводность, прочность и жа-

ропрочность, коррозионная стойкость и сопротивляемость износу и т. д., являются функцией состава электродного сплава и режимов его обработки.

1. МЕДЬ — ОСНОВА ЭЛЕКТРОДНОГО СПЛАВА

Принцип контактной сварки (сварки сопротивлением) основан на том, что электросопротивление токоподводящей части сварочной машины (система электродо-держатель—электрод) и на границе электрод—свариваемое изделие должно быть существенно меньше электросопротивления свариваемых изделий. Электросопротивление свариваемого изделия зависит от состава, материала, из которого изготовлено, а также его толщины (табл. 4).

ТАБЛИЦА 4
СРЕДНИЕ ЗНАЧЕНИЯ $R_{э-э.к}$ ПРИ СВАРКЕ ДВУХ ЛИСТОВ
РАВНОЙ ТОЛЩИНЫ [1]

Свариваемый материал	$R_{э-э.к}$, мкОм, при толщине листов, мм										
	0,3	0,5	1,0	1,5	2,0	3,0	0,3	0,5	1,0	1,5	2,0
	Точечная сварка						Роликовая сварка герметичным швом				
12Х18Н9Т	215	185	150	130	120	110	188	162	130	115	105
Сталь 08кп	150	135	115	100	90	75	110	95	80	70	50
Латунь Л62	76	48	30	24	20	18	46	29	18	15	12
Сплав Д16АТ	18	16	13	11	10	8	—	14	11	10	8

Таким образом, чем более электропроводным является свариваемый материал, тем более высокие требования предъявляют к электропроводности электродного сплава.

Первым материалом, используемым для изготовления электродов, являлась медь. Этот выбор не был случайным. Среди благородных материалов медь имеет самую высокую тепло- и электропроводность, хорошую технологичность на всех операциях изготовления полуфабрикатов, коррозионную стойкость и другие свойства, которые требуются для электродов. Химический состав основных марок меди, выпускаемой отечественной промышленностью, приведен в табл. 5.

ХИМИЧЕСКИЙ

Марка меди	Cu (не менее)	Примеси				
		Bi	Sb	As	Fe	Ni
M00*	99,99 + Ag	0,0005	0,001	0,001	0,001	0,001
M0	99,95	0,001	0,002	0,002	0,004	0,002
M06	99,97	0,001	0,002	0,002	0,004	0,002
M1	99,90	0,001	0,002	0,002	0,005	0,002
M1P	99,90 + Ag	0,001	0,002	0,002	0,005	0,002
M2	99,70 + Ag	0,002	0,005	0,01	0,05	0,2
M2P	99,70 + Ag	0,002	0,005	0,01	0,05	0,2
M3	99,50 + Ag	0,003	0,05	0,01	0,05	0,2
M3P	99,50	0,003	0,05	0,05	0,05	0,2

* Бескислородная.

ТАБЛИЦА 6
ХАРАКТЕРИСТИКИ МЕДИ

Свойство	Определяемое значение при температуре, °C						
	20	200	300	400	500	600	700
S_k , кгс/мм ²	110	98	31	23	18	15	11
σ_B , кгс/мм ²	22	20	15	11	7	5	3
$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	6	5	5	4	3	2	1
δ , %	45	45	40	38	47	57	71
ψ , %	90	88	77	73	86	100	100
a_H , кгс·м/см ²	17	15	14	14	12	9	8
HV , кгс/мм ²	50	40	38	35	19	12	9
HV_T (60 мин), кгс/мм ²	—	—	—	25	10	6	5
E , кгс/мм ²	12100	11500	10500	10300	9800	9300	8600
$\alpha \cdot 10^{-6}$ /град	—	17,3	17,6	17,9	18,3	18,6	19,0
ρ , мкОм·см	1,72	2,98	3,62	4,24	5,07	5,84	6,68
γ , м/(Ом·мм ²)	58	34	28	24	20	17	16
λ , Вт/(м·град)	409	393	393	392	380	372	365
c_p , кДж/(кг·град)	0,389	0,406	0,419	0,427	0,435	0,448	0,460
$\alpha \cdot 10^5$, м ² /с	11,75	10,25	9,85	9,60	9,35	9,1	8,8

Примечание. S_k — истинное сопротивление разрыву; σ_B — предел прочности; $\sigma_{0,2}$ — условный предел текучести; δ — относительное удлинение; ψ — относительное сужение; a_H — ударная вязкость; HV — твердость; HV_T — длительная горячая твердость; E — модуль нормальной упругости; $\alpha \cdot 10^{-6}$ — коэффициент линейного расширения; ρ — удельное электросопротивление; γ — электропроводность; λ — теплопроводность; c_p — теплоемкость; α — температуропроводность.

ТАБЛИЦА 5

СОСТАВ МЕДИ РАЗЛИЧНЫХ МАРОК, % (ПО МАССЕ) (ПО ГОСТ 859—66)

(не более)							Всего
Pb	Sn	S	O ₂	Zn	P	Ag	
0,001	0,001	0,002	0,001	0,001	0,0005	—	0,01
0,004	0,002	0,004	—	0,004	—	0,003	0,05
0,004	0,002	0,004	0,001	0,003	0,002	0,003	0,03
0,005	0,002	0,005	—	0,005	—	0,003	0,1
0,005	0,002	0,005	—	0,005	0,005—0,060	—	0,1
0,01	0,05	0,01	0,08	—	—	—	0,3
0,01	0,05	0,01	—	—	0,013—0,060	—	0,3
0,05	0,05	0,01	0,1	—	—	—	0,5
0,03	0,05	0,01	—	—	0,02—0,06	—	0,5

Основным недостатком меди как материала для электродов являются сравнительно низкие ее прочностные свойства (табл. 6). Практически удвоить твердость, предел прочности и утроить предел текучести меди можно холодной деформацией (прокатка, волочение) с суммарной степенью 40—70%. Зависимость основных механических свойств меди от степени деформации представлена на рис. 6. Однако сварка приводит к нагреву рабочего конца электрода до весьма значительной температуры и, следовательно, к разупрочнению ее вследствие рекристаллизации. Температура начала рекристаллизации современных промышленных марок меди находится в пределах 100—250°C в зависимости от чистоты по примесям и исходной степени холодной деформации (рис. 7). Таким образом, чистую медь как электродный материал практически во всех случаях применять не рационально. Деформация рабочего конца электрода, изготовленного из меди, происходит после нескольких десятков сварок (рис. 8).

Дальнейшая задача, с точки зрения выбора материалов для электродов, заключалась в том, чтобы в результате ограничения вредных примесей [7, 13] определенными пределами (табл. 5) и обоснованным легированием повысить ее основные свойства и в первую очередь температуру разупрочнения (рекристаллизации), сохранив при этом основные положительные качества на высоком уровне.

Рассматривая температуру начала рекристаллизации как показатель способности металла или сплава противостоять тепловым воздействиям, т. е. способности с которой непосредственно связана жаропрочность

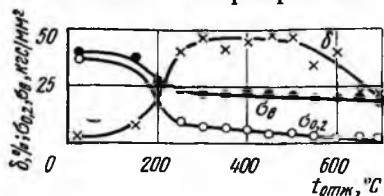
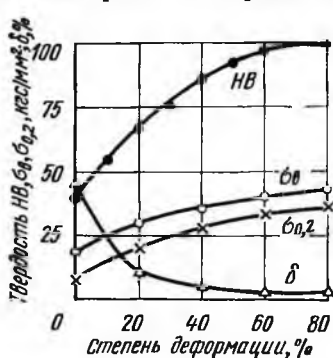


Рис. 7. Зависимость механических свойств меди, холодно деформированной на 40% от температуры отжига в течение 1 ч

Рис. 6. Зависимость механических свойств меди марки М1 от степени холодной деформации

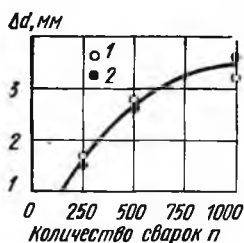


Рис. 8. Изменение исходного диаметра контактной поверхности электрода (Δd) из меди при сварке углеродистой (1) и нержавеющей (2) сталей

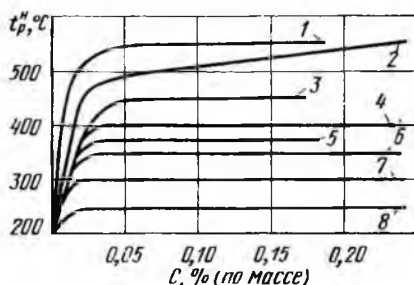


Рис. 9. Влияние примесей или малых концентраций легирующих элементов на температуру начала рекристаллизации меди (исходная суммарная холодная деформация образцов 40%):

1 — Zr; 2 — Hf; 3 — Ti; 4 — Cr, Mg, Sn, In, Te; 5 — Mn; 6 — Ag; Nb, Sb, Si, Cd, Al; 7 — P, As, Ge, V, Y; 8 — Co

можно отметить [8—10], что все примеси и легирующие элементы в той или иной степени повышают ее (рис. 9). Наиболее значительное влияние на эту характеристику оказывают добавки в количестве тысячных и сотых долей процента. Дальнейшее увеличение их концентрации к заметному росту температуры начала рекристаллизации не приводит. Малые добавки легирующих элементов, имеющих наименьшую растворимость в

твердой меди и высокую энергию связи с дефектами кристаллического строения, значительно повышают температуру рекристаллизации как двойных, так и более сложных композиций (цирконий и гафний до 550°C; титан до 450°C). При одновременном введении в медь нескольких элементов при условии, что они образуют с медью твердый раствор (не образуют соединений друг с другом), температура начала рекристаллизации в большинстве случаев повышается не более, чем при введении одной, наиболее результативно действующей добавки (например, в цирконийсодержащих сплавах — циркония).

Таким образом, если необходимо повышение только температуры рекристаллизации то введение для этой цели в ее состав нескольких легирующих элементов не является рациональным. Однако, если легирующие элементы образуют химические соединения между собой и выделяются в матрице в виде мелкодисперсных фаз, то в таких сплавах температура начала рекристаллизации определяется уже не влиянием отдельных элементов, а свойствами, количеством и морфологией выделяющихся частиц фазовых составляющих. Последнее касается в основном тройных и более сложных систем, хотя и в ряде двойных сплавов (меди с хромом, цирконием, гафнием и другими элементами) замедление образования и роста центров рекристаллизации также связывают [10] с выделением из твердого раствора при медленном охлаждении частиц второй фазы.

Примеси и малые добавки легирующих элементов действуют на удельное электросопротивление меди так же, как и на температуру рекристаллизации — увеличивают его (рис. 10). Анализируя данные, приведенные на рис. 10, следует иметь в виду, что экстраполяцию прямыми линиями

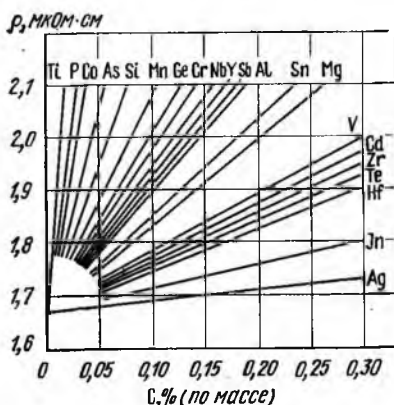


Рис. 10. Влияние концентрации ряда примесей или легирующих элементов на удельное электросопротивление меди высокой чистоты

зависимостей удельного электросопротивления (до 2,1 мкОм·см) от концентрации примесей [до 0,3% (по массе)] для элементов, растворимость которых в меди в интервале температур переменна и меньше приведенной предельной величины, можно принять лишь условно.

Одновременное повышение температуры начала рекристаллизации и удельного электросопротивления (понижение электропроводности) меди в результате действия примесей или легирующих элементов неизбежно. Поэтому наиболее рациональным способом решения этой компромиссной, но основной задачи при выборе электродных материалов является создание сплавов, в которых максимальное улучшение одного из свойств сопровождалось бы минимальным ухудшением другого.

Например, из приведенных на рис. 9 и 10 данных следует необходимость ограничения до возможного минимума таких примесей, как P, As, Si, Al, Sb, и легирование Ag, Cd, Zr, Hf, Mg.

Однако подобный подход к выбору оптимального сплава в настоящее время, за редким исключением, примитивен и уже не дает результата, соответствующего требованиям современной промышленности. В большинстве случаев наибольший эффект получается при применении сплавов, состав которых более сложен, чем указан выше.

2. НИЗКОЛЕГИРОВАННЫЕ МЕДНЫЕ СПЛАВЫ. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ ЛЕГИРОВАНИЯ, ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА, СТРУКТУРЫ, СВОЙСТВ

Само название сплавов «низколегированные» указывает на ограничение суммарного количества легирующих элементов в них определенным небольшим концентрационным пределом. Точно установленного предела легирования сплавов такого типа не существует. В литературе на этот счет приведены цифры от 0,5 до 5%. Учитывая требования, предъявляемые к основным свойствам сплавов, при их определении нельзя исходить только из концентрационного ограничения легирования. Низколегированными медными сплавами следует называть сплавы, суммарная концентрация легирующих элементов в которых (примерно до 5%) обеспечивает

сохранение на достаточно высоком уровне всех положительных свойств меди, существенно увеличивая при этом температуру ее разупрочнения (рекристаллизации), сопротивление пластической деформации и разрушению при температурах эксплуатации выше температуры начала рекристаллизации основы при длительном или кратковременном воздействии постоянных или переменных внешних сил и электропроводность которых не ниже некоторой величины (например, $20 \text{ м/Ом} \cdot \text{мм}^2$ при 20°C ; электропроводности, равной $20 \text{ м/Ом} \cdot \text{мм}^2$, соответствует электросопротивление $5 \text{ мкОм} \cdot \text{см}$ и теплопроводность $145 \text{ Вт/м} \cdot \text{град.}$). Условность такой формулировки очевидна как относительно концентрационного и температурного ограничений, так и допустимого предельного снижения электропроводности прежде всего потому, что электропроводность определяется не только суммой процентного содержания легирующих компонентов в сплаве, но и химическим взаимодействием между ними, и состоянием материала перед началом испытаний или эксплуатации, а температура начала рекристаллизации меди может изменяться в широких пределах в зависимости от ее чистоты, степени деформации, продолжительности воздействия температуры.

Однако, несмотря на значительную условность, такое определение необходимо, так как позволяет ограничить группу сплавов определенными пределами и тем самым установить общие закономерности их легирования, структуры, свойств, выбора схемы производства и параметров изготовления полуфабрикатов [4, 14, 15].

В настоящее время определен комплекс электродных сплавов, который как в СССР, так и за рубежом в основном решает задачи, связанные с успешным использованием достижений сварочного производства в различных отраслях промышленности. Составы этих сплавов приведены в табл. 7.

Кроме того, в СССР применяют следующие электродные сплавы на основе меди. БрСр: $\text{Cu} + 0,07 \div 0,12\% \text{ Ag}$; БрКд: $\text{Cu} + 0,9 \div 1,2\% \text{ Cd}$; БрХ: $\text{Cu} + 0,4 \div 1,0\% \text{ Cr}$; БрХЦр: $\text{Cu} + 0,4 \div 1,0\% \text{ Cr} + 0,05 \div 0,08\% \text{ Zr}$; БрХЦр-А: $\text{Cu} + 0,15 \div 0,35\% \text{ Cr} + 0,07 \div 0,15\% \text{ Zr}$; БрХВЦр: $\text{Cu} + 0,35 \div 0,70\% \text{ Cr} + 0,15 \div 0,30\% \text{ Zr} + 0,15 \div 0,40\% \text{ V}$; БрКБ: $\text{Cu} + 2,3 \div 2,7\% \text{ Co} + 0,4 \div 0,7\% \text{ Be}$; БрКХКо: $\text{Cu} + 0,4 \div 0,8\% \text{ Cr} + 1,3 \div 1,8\% (\text{Co} + \text{Ni}) + 0,3 \div 0,6\% \text{ Si}$; БрНБТ: $\text{Cu} + 1,4 \div 1,6\% \text{ Ni} + 0,2 \div 0,4\% \text{ Be} + 0,05 \div 0,15\% \text{ Ti}$; БрНХК: $\text{Cu} + 0,4 \div 1,0\% \text{ Cr} + 2,2 \div 2,8\% (\text{Ni} + \text{Co}) + 0,5 \div 0,9\% \text{ Si}$.

ТАБЛИЦА 7

СОСТАВ И СВОЙСТВА ОСНОВНЫХ ЭЛЕКТРОДНЫХ СПЛАВОВ ПО ОБОЩЕННЫМ ДАННЫМ ФИРМ «MALLOU» (АНГЛИЯ), «KABELMETAL» (ФРГ), «LB BRONZE INDUSTRIAL» (ФРАНЦИЯ), «SCIACU» (ИТАЛИЯ) И НЕКОТОРЫХ ДРУГИХ

Система	Содержание легирующих компонентов	Свойства							
		$t_{\text{рекр}}, ^\circ\text{C}$	HB/HRB	$\sigma_{\text{в}}, \text{кгс/мм}^2$	$\sigma_{0,2}, \text{кгс/мм}^2$	$\delta_5, \%$	$\rho, \text{мКОМ} \cdot \text{см}$	$\lambda, \frac{\text{кал}}{(\text{см} \times ^\circ\text{C})}$	$\gamma \frac{\text{МКОМ} \cdot \text{мм}^2}{\% \text{ IACS}}$
Класс 1									
Cu—Ag ^{*1}	~1% Ag	350	$\frac{100-140}{61-77}$	≥ 30	≥ 25	≥ 5	1,73—1,82	0,90	$\frac{55-58}{95-100}$
Cu—Cd ^{*2}	~1% Cd	350	$\frac{105-140}{63-77}$	35—50	32—48	5—10	1,82—2,13	0,85	$\frac{47-55}{81-95}$
Класс 2									
Cu—Cr ^{*3}	0,4—1,0% Cr	475	$\frac{120-150}{71-81}$	40—50	28—47	10—25	1,93—2,13	0,80	$\frac{47-52}{80-88}$
Cu—Cr—Zr ^{*4}	0,4—1,0% Cr	500	$\frac{130-150}{73-81}$	45—52	32—50	18—25	1,93—2,13	0,85	$\frac{47-52}{80-88}$
	0,02—0,10% Zr	525	$\frac{155-185}{83-91}$	50—65	45—58	10—20	2,0—2,2	$\frac{0,75-0,8}{0,8}$	$\frac{>44}{>76}$
Класс 3									
Cu—Co—Be ^{*5}	2,35—2,70% Co, 0,4—0,7% Be	500	$\frac{220-270}{97-106}$	70—90	58—75	10—20	3,13—3,85	0,5	$\frac{26-32}{45-55}$

^{*1} Материалы элбродур, судалокс 100.

^{*2} Материалы CDI, элбродур С, элалой А.

^{*3} Материалы меллори 3; элбродур N; хидурель; судалокс 200.

^{*4} Материалы меллори 328; элбродур RS; CRM16; элбродур NF; CRM16X.

^{*5} Материалы меллори 100, элбродур B; CB 4; судалокс 300.

Химический состав этих сплавов по примесям приведен в табл. 8.

По типу упрочнения их делят на две основные группы: упрочняемые холодной деформацией (сплавы систем Cu—Ag и Cu—Cd) и упрочняемые в результате распада (старения) пересыщенного твердого раствора — дисперсионно твердеющие сплавы.

Дисперсионно твердеющие сплавы имеют ряд преимуществ по сравнению со сплавами другого типа. Важнейшими из них являются высокая температура начала разупрочнения, хорошее сочетание прочностных свойств, пластичности, жаропрочности с тепло- и электропроводностью, возможность получения достаточно высоких свойств независимо от габаритов полуфабрикатов и электродов, возможность изменять свойства применительно к конкретным условиям эксплуатации.

Из табл. 7 и приведенных данных видно, что в основе всех отечественных и зарубежных дисперсионно твердеющих электродных сплавов лежат системы, диаграммы состояния которых показаны на рис. 11 (Cu—Cr), рис. 12 (Cu—Cr—Zr), рис. 13, 14 (Cu—Co—Si и Cu—Ni—Si) и рис. 15 (Cu—Ni—Be). Основной особенностью всех систем является расширение области α -твердого раствора с повышением температуры. Это необходимое условие для получения пересыщенного твердого раствора при закалке и эффекта его распада при старении. В результате распада происходит выделение мелкодисперсных частиц фаз-упрочнителей. Такими фазами в современных электродных сплавах являются: хром в хромовых бронзах (рис. 11), Co_2Si и Ni_2Si в кобальткремниевых и никелькремниевых бронзах (рис. 13 и 14), CoBe и NiBe в кобальтбериллиевых и никельбериллиевых бронзах (рис. 15).

Нашедшие применение в промышленности сплавы системы Cu—Cr—Zr , так же как и двойные меднохромовые сплавы, упрочняются выделениями хрома [12, 21,

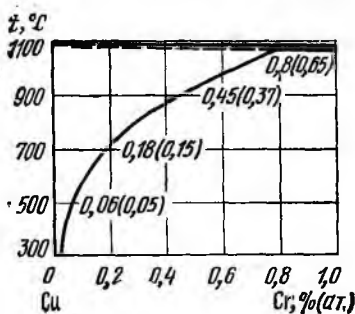


рис. 11. Медный угол диаграммы состояния системы Cu—Cr [в скобках указан состав в % (по массе)]

ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ ЭЛЕКТРОДНЫХ СПЛАВОВ

Сплав	Вl	As	Fe	Pb	Sn	Zn
BrCr	0,002	0,002	0,005	0,005	0,002	0,01
BrX	—	—	0,08	—	—	0,3
BrXЦр	0,002	0,01	—	0,003	0,01	0,01
BrXЦр-А	—	—	0,05	0,005	—	0,015
BrXВЦр	—	—	0,02	0,005	—	0,01
BrКХКо	—	—	0,06	0,005	—	0,05
BrНБТ	—	—	—	0,005	0,01	0,2
BrНХК	0,004	0,03	0,06	0,005	0,03	0,05

Примечание. В сплавах BrКд и BrКБ примеси не регламентируются.

25, 26] в отличие от ранее бытовавшего мнения об упрочнении наиболее жаропрочных сплавов этой системы соединением Cr_2Zr [19, 20].

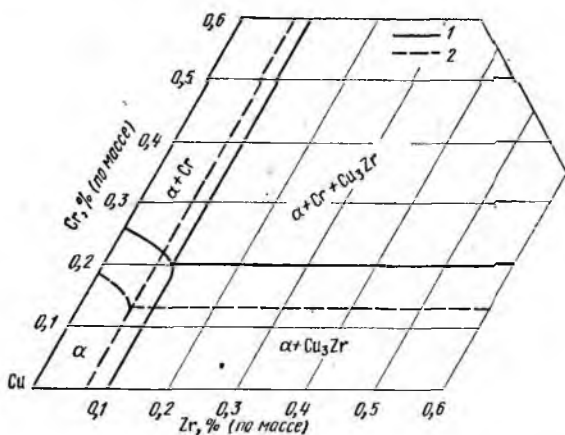


Рис. 12. Изотермические разрезы медного угла диаграммы состояния системы $\text{Cu}-\text{Cr}-\text{Zr}$ при температурах 950 (1) и 900°C (2) [12]

Величина упрочнения при дисперсионном твердении зависит в основном от объемной доли, формы, размеров выделившихся частиц, а также от характера сопряжения решеток выделений и матрицы. Наиболее сильный эффект старения, а следовательно, наиболее высокие прочностные свойства в результате термической об-

ТАБЛИЦА 6
ПО ПРИМЕСЯМ, % (НЕ БОЛЕЕ)

Другие элементы	Сум- ма
0,005 Ni	0,1
	0,5
0,003 Ni	0,1
0,01 P; 0,05 Si	0,15
0,01 P; 0,02 Si; 0,02 Mg	0,2
—	0,3
0,15 Al	0,7
0,05 Zr; 0,05 Ti	0,4

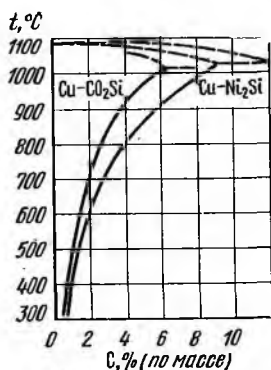


Рис. 14. Растворимость соединений Co_2Si и Ni_2Si в меди при различных температурах [17]

работки имеют сплавы таких систем, которые обеспечивают значительное изменение растворимости легирующих элементов в меди в твердом состоянии с температурой. К таким системам относятся Cu—Ni—Si , Cu—Co—Si , Cu—Co—Be , Cu—Ni—Be (рис. 13—15). Прирост прочностных свойств сплавов этих систем в результате старения составляет 250—350% по сравнению с закаленным состоянием. В то же время хорошая электро- и теплопроводность определяется минимальной концентрацией легирующих элементов в медном твердом растворе при температуре старения (системы Cu—Cr и Cu—Cr—Zr , см. рис. 11 и 12).

Однако, чем значительно изменяется растворимость легирующих элементов в твердом растворе основы в интервале температур $t_{\text{зак}}—t_{\text{стар}}$, тем менее жаропрочны сплавы системы. При уменьшении зависимости растворимости от температуры склонность к коагуляции частиц выделений уменьшается, и поэтому температурный коэффициент разупрочнения снижается. Следовательно, в зависимости от условий эксплуатации сплава оптимальная величина растворимости в интервале температур должна быть различной. Например, сплавы системы Cu—Ni—Si значительно прочнее в интервале температур 20—500°C сплавов системы Cu—Co—Si (рис. 14), в то время как последние более жаропрочны за пределами указанного температурного интервала.

Для сплавов, в основе которых лежат тройные или более сложные системы, возможно образование терми-

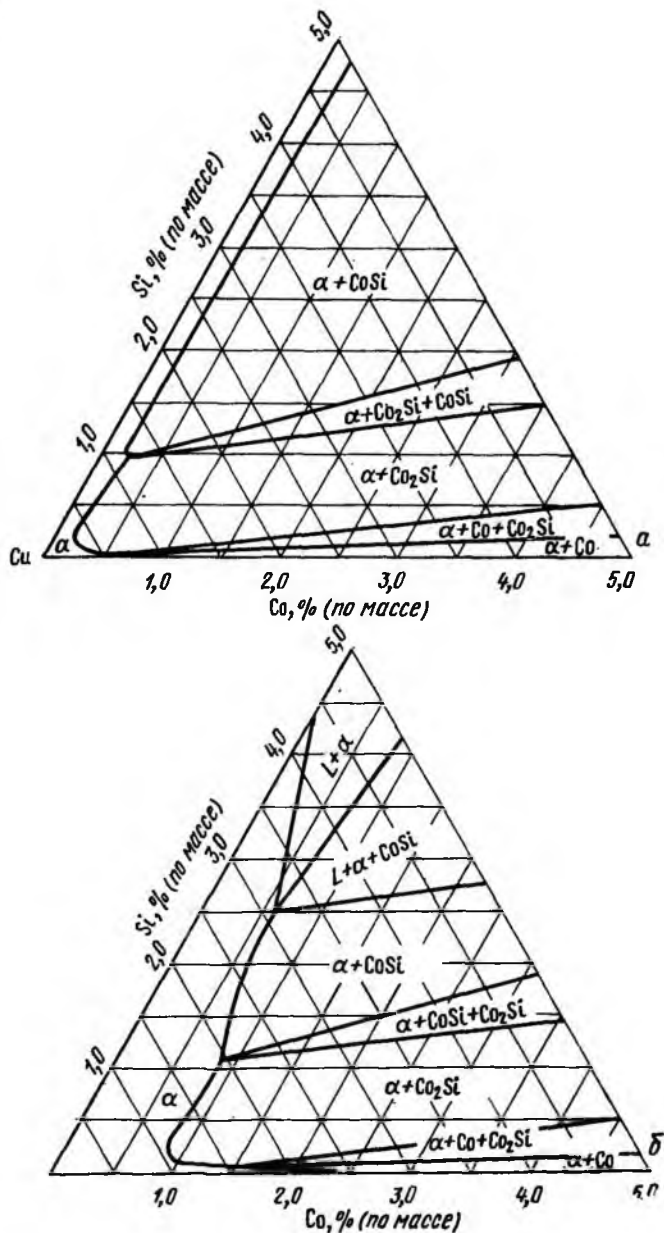


Рис. 13. Изотермические разрезы медного угла диаграммы состояния Cu—Co—Si при температурах 700 (а) и 900°C (б) [16]

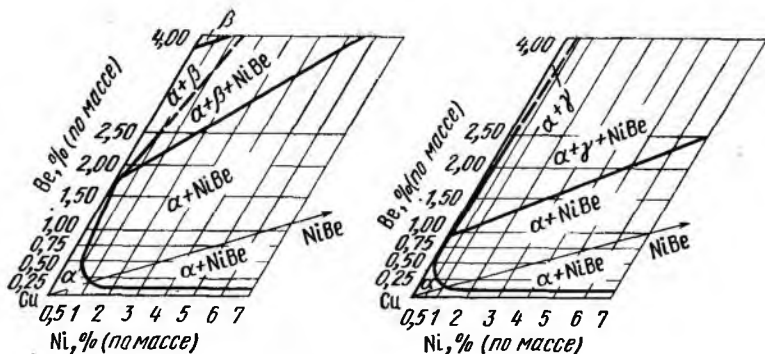


Рис. 15. Изотермические разрезы медного угла диаграммы состояния системы Cu—Ni—Be при температурах 820 (а) и 500°С (б) [18]

чески стойких и прочных соединений в результате химического взаимодействия легирующих элементов.

Это позволяет обеспечивать высокую прочность и жаропрочность материала. При образовании химических соединений, не содержащих атомов металла-растворителя, значительно замедляются диффузионные процессы и связанное с ними растворение фаз-упрочнителей, их коагуляция с ростом температуры, а следовательно, и разупрочнение. Примером этого являются сплавы систем Cu—Ni—Be, Cu—Co—Be, Cu—Ni—Si, Cu—Co—Si и некоторые другие. Как правило, в таких системах при определенном соотношении легирующих компонентов резко возрастает также тепло- и электропроводность, что объясняется изменением растворимости (уменьшением ее) компонентов и меди в твердом состоянии в результате их взаимного влияния [14, 16, 22]. Объяснение этого эффекта образованием молекулярных комплексов химических соединений (или ближнего порядка) в твердых растворах сплавов, состав которых лежит на так называемых квазибинарных сечениях медь—химическое соединение, в результате исследований не подтвердилось. При закалке сплавов, состав которых при этой обработке обеспечивает их однородную структуру независимо от того, предполагается ли в изучаемой системе квазибинарное сечение или нет, аномальных изменений электросопротивления не обнаруживается. На рис. 16 и 17 показаны диаграммы состав—свойство для двух из указанных выше систем, где в закаленном состоянии (закалка с 900—950°С) не

обнаруживается каких-либо отклонений от зависимости, свойственной твердым растворам. Только в состаренном состоянии зависимость предела прочности и удельного электросопротивления от состава имеет явнс

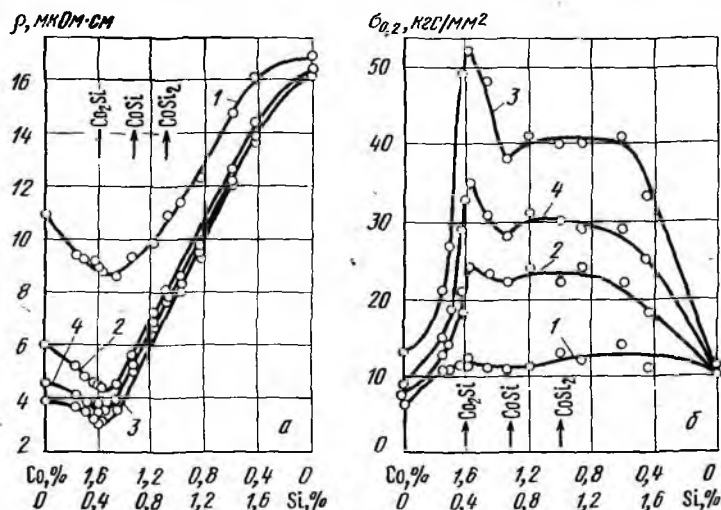


Рис. 16. Зависимость электросопротивления (а) и предела текучести (б) сплавов Cu — Co — Si, содержащих 98% Cu, от соотношения кобальта и кремния; после закалки с 900°C (1); после закалки и старения в течение 4 ч при температурах 400 (2), 450 (3) и 500°C (4)

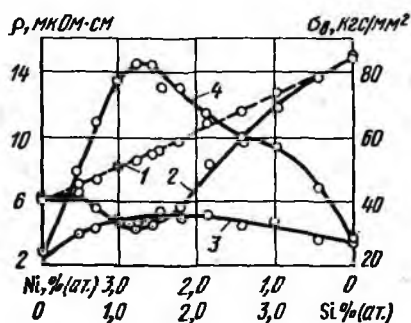


Рис. 17. Влияние состава и соотношения легирующих элементов (содержание меди 96%) на свойства сплавов системы Cu — Ni — Si после закалки (1, 3) и после закалки со старением (2, 4): 1, 2 — электросопротивление; 3, 4 — предел прочности

выраженный экстремальный характер. Причем характер зависимостей свойств практически соответствует положению границы предельной растворимости на изотермическом сечении соответствующей диаграммы состояния. Максимально достижимая прочность и минимальное электросопротивление соответствуют соотно-

шению легирующих элементов, необходимых для образования в сплаве определенного химического соединения. Например, для сплавов системы Cu—Co—Si (рис. 16) соотношение кобальта и кремния практически соответствует стехиометрическому составу для образования соединения Co_2Si (близко к 4:1).

При отклонении от указанного соотношения элементов увеличивается их растворимость в твердом растворе, что и определяет в основном соответствующее повышение электросопротивления (см. рис. 16, а).

Влияние состава на предел текучести значительно сложнее. В данном случае следует учитывать и изменение растворимости, а также влияние природы выделяющихся в результате старения фаз (структуры, морфологии выделений). При отклонении от оптимального соотношения легирующих компонентов в сторону увеличения содержания кремния предел текучести сплавов снижается, но не в столь значительной степени, как это оказывает влияние на повышение их удельного электросопротивления. Однако если речь идет о сочетании в сплаве высокого предела текучести с низким электросопротивлением, то его состав определяется очень точным соотношением кобальта и кремния, близким к расчетному для образования соединения Co_2Si . Последнее, естественно, вызывает определенные трудности при воспроизведении заданного состава сплава в промышленных условиях.

Таким образом, экстремальный характер свойств сплавов исследуемой системы определяется химическим взаимодействием компонентов с образованием определенного соединения и взаимным влиянием компонентов на их растворимость в меди в твердом состоянии, т. е. частью диаграммы состояния (см. рис. 13).

Свойства дисперсионно твердеющих сплавов существенно зависят также и от температуры, и времени старения. В качестве примера на рис. 18 приведены данные по кинетике старения электродного сплава — хромовой бронзы [23]. Как следует из данных, приведенных на рис. 18, максимально возможных значений твердости для сплава Cu—Cr можно достичь при разных температурах в интервале 350—550°C, варьируя время выдержки от 10 до 10^5 мин. С увеличением температуры старения время выдержки, необходимое для достижения максимальной твердости, уменьшает-

ся. Однако значений твердости, отвечающих оптимальному сочетанию других свойств, сплав достигает значительно позднее заметного развития распада твердого раствора. Начиная с температуры 450°C и выше практически полный распад пересыщенного твердого раствора происходит за первые 10 мин. Зафиксировать

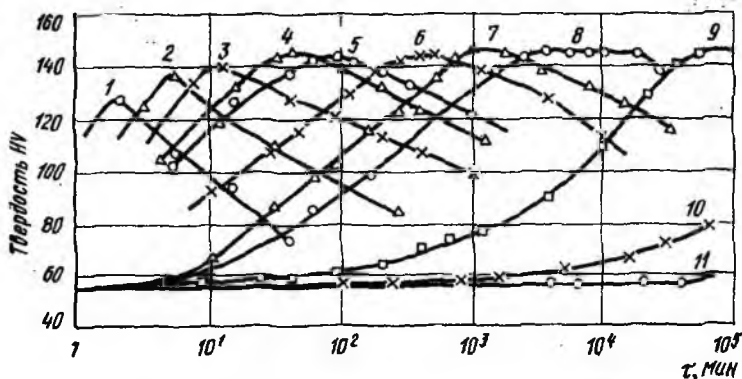


Рис. 18. Влияние времени старения на твердость хромовой бронзы при различных температурах, $^{\circ}\text{C}$:

1 — 700; 2 — 600; 3 — 550; 4 — 500; 5 — 475; 6 — 450; 7 — 425; 8 — 400; 9 — 350; 10 — 300; 11 — 200

этот эффект можно, например, по выходу кривой удельного электросопротивления на практически линейный участок с минимальным значением исследуемой характеристики. Объясняется это тем обстоятельством, что для получения максимальных значений твердости (пределов прочности, текучести) не достаточно только одного факта распада твердого раствора. Большое значение в данном случае имеет формирование определенной структуры сплава, а именно форма, размер, расстояние между частицами фазы-упрочнителя, их распределение в матрице. Последним объясняется и сравнительно быстрое уменьшение твердости при нагреве сплава выше 500°C (коагуляция частиц выделившейся фазы).

Холодная деформация между закалкой и старением существенно повышает прочностные свойства сплавов. Это связано как с дополнительным упрочнением, получаемым за счет полей упругих напряжений от дислокаций, имеющих в деформированной матрице, так и вследствие изменения в кинетическом и морфо-

логическом аспектах процесса выделения и роста частиц второй фазы. Абсолютный уровень прочностных свойств сплавов, прошедших термомеханическую обработку (ТМО)*, значительно выше, чем у сплавов, подвергнутых старению без предварительной деформации, хотя относительный прирост прочностных свойств в результате старения в большинстве случаев оказывается после ТМО ниже. Связано это только с тем, что деформированный после закалки сплав имеет значительно более высокий исходный уровень свойств. Максимум прочностных свойств у сплавов, прошедших ТМО, достигается при меньшей температуре старения, чем у сплавов, состаренных непосредственно после закалки, при одинаковом времени старения, либо значительно быстрее при одинаковой температуре старения. Ускорение процесса распада пересыщенного твердого раствора в деформированных сплавах может быть обусловлено облегчением зарождения выделений в условиях повышенной плотности дислокаций и дефектов упаковки, ускорением в этих условиях диффузионных процессов.

Однако холодная деформация перед старением ускоряет не только процессы упрочнения, но по тем же самым причинам и процессы разупрочнения. Электродные сплавы, прошедшие ТМО, в случае, если они эксплуатируются в условиях высоких темпов сварки или сравнительно продолжительных сварочных импульсов (мягкий режим), т. е. когда на рабочем конце электрода развиваются температуры более $500-600^{\circ}\text{C}$, разупрочняются значительно интенсивнее сплавов, подвергнутых обычной термической обработке (закалке и старению). В этих случаях высокий уровень исходных прочностных свойств сплавов после ТМО не должен служить единственным основанием для их применения (рис. 19). Таким образом, оптимизация режимов обработки сплавов применительно к конкретным условиям их эксплуатации — один из эффективных путей успешного решения проблемы электродов контактной сварки.

Другим, не менее эффективным, хотя и более сложным путем повышения долговечности электродов явля-

* Термомеханическая обработка (ТМО) в данном случае — вид термической обработки, включающей пластическую деформацию, которая влияет на формирование структуры при фазовых превращениях, происходящих в процессе термического воздействия [24].

ется усложнение составов электродных сплавов. Например, для условий длительной эксплуатации в широком интервале температур, в том числе и за пределами температур старения, наиболее эффективными оказываются многофазные сплавы. В них при кристаллизации и распаде пересыщенного твердого раствора образуются две или более мелкодисперсные фазы, одна из которых обеспечивает необходимый эффект старения,

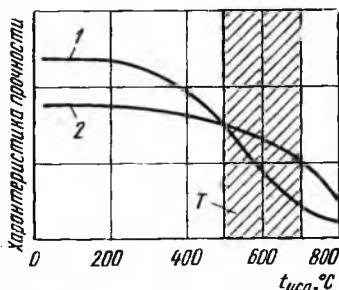
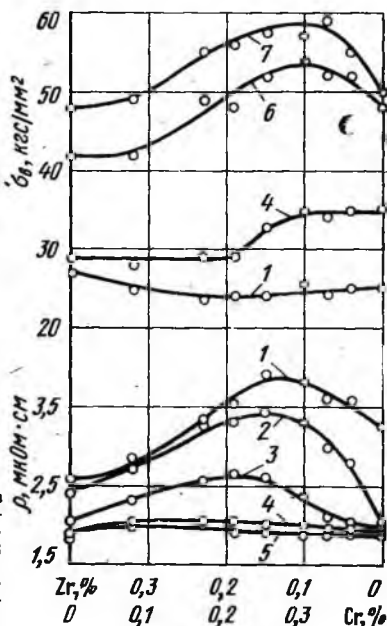


Рис. 19. Схема влияния температуры испытания на прочность свойства электродных дисперсионно твердеющих сплавов:

1 — сплав подвергнутый ТМО; 2 — сплав после старения без предварительной деформации; Т — температурный интервал работы электродов

Рис. 20. Изменение свойств сплавов Cu—Cr—Zr в зависимости от соотношения хрома и циркония после закалки с 900°C (1); закалки и старения при 400 (2), 450 (3), 475 (4) и 500°C (5); закалки, деформации на 30% и старения при 475°C (6); закалки, деформации на 75% и старения при 475°C (7)



а другая, практически не растворяясь в основе и препятствуя росту зерен, создает необходимую жаропрочность и малый темп разупрочнения при нагреве до температур выше температуры старения. К таким сплавам относятся сплавы систем Cu—Ni—Si—Cr и Cu—Co—Si—Cr (сплавы БрНХК и БрКХКс), в которых фазами-упрочнителями соответственно являются Ni_2Si , Cr_3Si и Co_2Si , $\text{Cr}_3\text{Co}_5\text{Si}_2$. В перспективе жаропрочные электропроводные материалы могут содержать кроме подобных фаз, и такие, как окислы, карбиды, бориды и т. д. В этом случае предельные температуры их эксплуатации будут еще выше. Подобное упрочнение сплавов можно именовать каскадным или эстафетным.

При изложении основных принципов легирования электродных сплавов весьма показательным является пример оптимизации состава хромциркониевой бронзы (БрХЦр) и объяснение причин положительного влияния малых добавок циркония на свойства хромовой бронзы.

Низколегированные сплавы системы Cu—Cr—Zr изучают и в СССР, и за рубежом [2, 3, 5, 12, 13, 19, 20, 25—27]. Однако до последнего времени не было единого мнения относительно оптимальных химических составов сплавов, диаграммы состояния системы, структуры и состава выделяющейся при старении фазы, причин более высоких свойств тройного сплава по сравнению с хромовой бронзой, механизма положительного влияния циркония.

Исследования свойств сплавов системы Cu—Cr—Zr (рис. 20) с различным соотношением легирующих компонентов (при суммарном их содержании 0,4% по массе) [25] показали, что одновременное введение хрома и циркония в сплав приводит к повышению электросопротивления в закаленном состоянии. Это объясняется увеличением растворимости в меди каждого из компонентов в присутствии другого, что находится в соответствии с диаграммой состояния системы (см. рис. 12) [12], которую можно считать наиболее точной. Старение после закалки приводит к возрастанию прочности и уменьшению электросопротивления, причем рост предела прочности наблюдается лишь у сплавов, содержащих хром и хром с добавкой циркония до 0,2%. Деформация перед старением обеспечивает значительное повышение предела прочности сплавов всех исследуемых составов. Для достижения максимальных прочностных свойств содержание циркония в сплавах не целесообразно увеличивать более 0,1%.

Структурные исследования сплавов, содержащих до 1% Cr и до 0,1% Zr, показали [25, 26], что как в двойном Cu—Cr , так и в тройном сплаве Cu—Cr—Zr при старении выделяется одна и та же фаза с о.ц.к. решеткой, близкая по составу к чистому хрому. Фаза, которая отвечала бы по составу цирконию либо какому-нибудь соединению, содержащему цирконий (например, Cu_3Zr — по диаграмме состояния), обнаружена не была. Выделения хрома определенным образом ориентированы в матрице — о. ц. к. решетка большинства

выделений хрома как в двойном, так и в тройном сплавах связана с г. ц. к. решеткой матрицы ориентационным соотношением Курдюмова—Закса [26]. При увеличении температуры старения выше 500°C (600 — 700°C) наблюдается отличие структуры двойного сплава от тройного (рис. 21). Если при температуре старения 500°C выделения в сплавах проявляются на микрофотографиях в виде деформационного контраста,

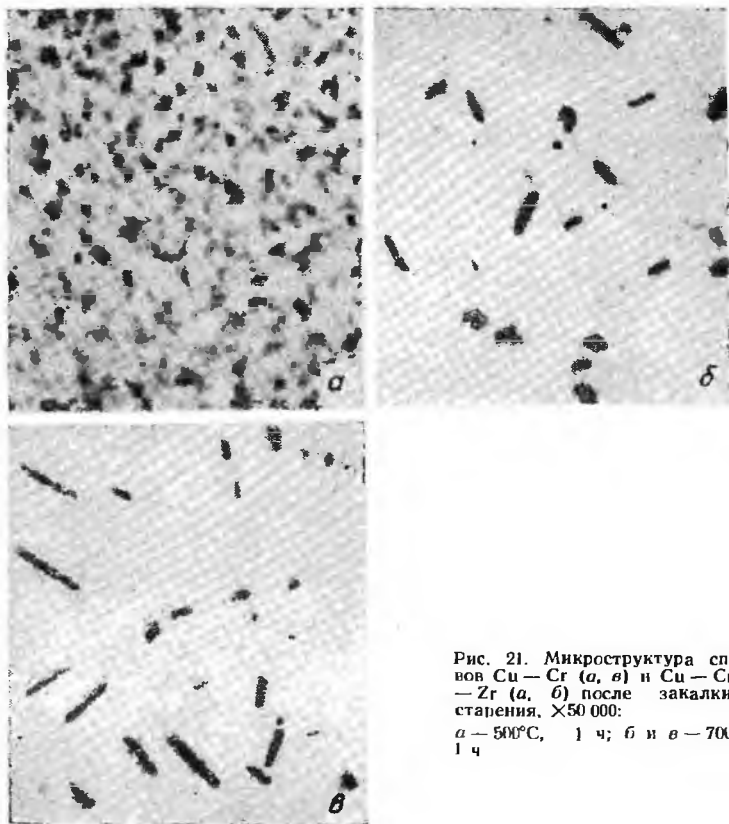


Рис. 21. Микроструктура сплавов Cu—Cr (а, в) и Cu—Cr—Zr (а, б) после закалки и старения, $\times 50\,000$:

а — 500°C , 1 ч; б и в — 700°C , 1 ч

подобного контрасту от полей упругих напряжений вокруг когерентных выделений (рис. 21,а), а их размер практически одинаков и оценивается 180 — $190\text{ \AA}$, то при температурах старения 600 и 700°C выделения приобретают явно выраженную стержнеобразную

форму (рис. 21, б, в) причем размер выделений в тройном сплаве почти в два раза меньше по сравнению с двойным (при 600°C соответственно 350 и 570 Å; при 700°C 2170 и 3420 Å)*.

Анализ возможных механизмов влияния малых добавок циркония на размер частиц второй фазы приводит к выводу о том, что наиболее вероятным является уменьшение диффузионной подвижности атомов хрома из-за присутствия атомов циркония в твердом растворе, в результате чего должен быть замедлен рост выделений хрома. Исследование кинетики распада пересыщенного раствора по изменению электросопротивления в процессе старения при 480°C показало, что в двойном сплаве распад протекает значительно интенсивнее, чем в тройном. Максимальная скорость распада в двойном сплаве в три раза больше по сравнению с тройным. Распад в двойном сплаве заканчивается через 45 мин, в тройном же лишь через 75 мин. На основании этих данных можно сделать вывод о том, что малая добавка циркония к сплаву меди с хромом существенно замедляет диффузию атомов хрома в медной матрице. Ответственным за такое замедление диффузии можно принять механизм «отравления» вакансий атомами циркония, т. е. образование устойчивых комплексов вакансия—атом циркония, в результате чего уменьшается число подвижных вакансий, принимающих участие в транспортировке атомов хрома. Такой механизм весьма вероятен, поскольку большая разница в атомных радиусах циркония и меди (25%) должна обеспечить достаточно высокое значение энергии связи комплекса, основной вклад в которую дает упругая составляющая, пропорциональная разнице атомных радиусов растворителя и добавки.

А. И. Новиковым было показано, что деформация после закалки приводит к образованию в сплавах практически одинаковой ячеистой структуры, состоящей из пространственной сетки границ, образованных сплетениями дислокаций и отделяющих друг от друга области со сравнительно низкой концентрацией дислокаций (рис. 22,а). Размер ячеек у обоих сплавов составляет

* Новиков А. И. Старение хромовых и хромоциркониевых бронз и изменение структуры электродов из этих сплавов при контактной сварке. Автореф. канд. дис. М., 1976.

в среднем около 3 мкм при деформации на 5% и 0,5 мкм при увеличении деформации до 75%. Старение сплавов в течение часа при 600°C приводит к распаду твердого раствора и выделению частиц второй фазы (рис. 22,б). При этом у двойного сплава Cu—Cr размер ячеек возрастает в среднем до 7 мкм, а у сплава Cu—Cr—Zr остается на уровне деформированного

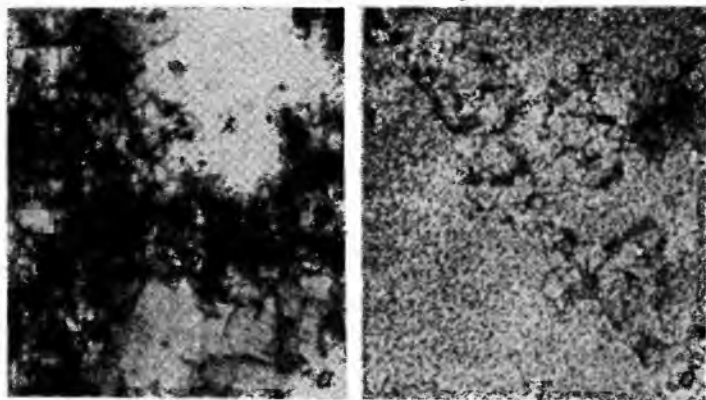


Рис. 22. Ячеистая структура хромовой бронзы, деформированной растяжением на 5%, $\times 12\,000$:

а — исходное состояние; *б* — после старения при 600°C, 1 ч

состояния. Эффект подобного действия малых добавок циркония к двойному сплаву, приводящего к торможению движения стенок ячеек, можно объяснить образованием атмосфер атомов циркония на дислокациях, замедляющих их движение и перераспределение. Последнее объясняет и задержку образования зародышей рекристаллизации в тройном сплаве по сравнению с двойным.

Изучение кинетики изменения доли рекристаллизованного объема при 600°C показало, что для полной рекристаллизации тройного сплава требуется времени в три раза больше, чем для двойного. Соответственно сплав Cu—Cr—Zr имеет более высокие механические свойства в интервале рабочих температур (рис. 23) и разупрочняется значительно медленнее, чем сплав Cu—Cr (см. рис. 27).

Относительно тонкой структуры сплавов Cu—Cr и Cu—Cr—Zr и ее изменений при старении и деформа-

ции следует заметить, что все это характерно и для других дисперсионно твердеющих электродных сплавов с той лишь разницей, что при значительном отличии параметров структуры матрицы и выделений на ранних стадиях старения может образовываться промежуточная фаза. Например, для сплавов систем Cu—Ni—Si и Cu—Co—Si предполагают образование такой фазы [28].

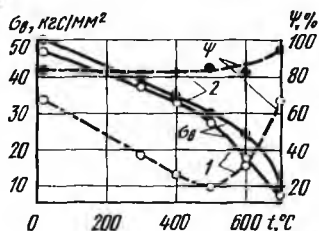


Рис. 23. Влияние температуры испытания на прочность и пластичность сплавов Cu+0,67% Cr (1) и Cu+0,65%Cr+0,05%Zr (2). Исходное состояние: закалка с 990°C+деформация на 50%+старение при 460—470°C, 4 ч

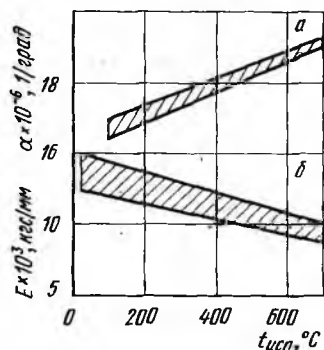


Рис. 24. Зависимость коэффициентов линейного расширения (а) и модулей упругости (б) меди, а также низколегированных медных сплавов от температуры испытаний

Таким образом, можно заключить, что введение в состав сплава небольших добавок (как правило, не более сотых долей процента) определенного третьего, четвертого и т. д. элемента, позволяющего повысить температуру его рекристаллизации или «отравить» вакансии и, следовательно, затормозить диффузионные процессы в нем, является важнейшим принципом легирования. Наряду с этим нельзя не учитывать и целесообразность расчета на образование в сплаве термически стойких, тугоплавких и прочных химических соединений, усложнения состава выделяющихся в процессе старения фаз, применения многофазных сплавов, регулирования растворимости легирующих компонентов в основе.

Как было показано выше, свойства низколегированных сплавов существенно зависят от состава (легирующих элементов, их количества и соотношения, примесей) и режимов обработки (термической, термомеханической). Однако существует и ряд свойств, ко-

торые определяются свойствами основы сплавов (медью) и сравнительно слабо изменяются с изменением их состава. К таким свойствам относятся коррозионная стойкость, жаростойкость (т. е. сопротивление атмосферной коррозии), температурные коэффициенты модуля упругости, удельного электросопротивления, линейного расширения, теплоемкости (без учета изменений, обусловленных фазовым превращением). В качестве иллюстрации на рис. 24 приведены температурные зависимости коэффициентов линейного расширения и модулей упругости, построенные по фактическим экспериментальным данным для меди и для различных низколегированных сплавов. Как видно, независимо от составов сплавов эти характеристики описываются сравнительно узкими областями.

Вообще корреляция между многими физическими и механическими свойствами является одной из основных особенностей сплавов рассматриваемого типа. Связи между свойствами статистически значимы даже при доверительной вероятности, равной 99,9%. На рис. 24 уже было показано наличие хорошей корреляции как между модулями нормальной упругости, так и между коэффициентами линейного расширения сплавов при различных температурах. Расчет коэффициентов корреляции показал, что для этих характеристик они находятся в пределах от 0,91 до 1 (напомним, что коэффициент корреляции, равный 1, характеризует функциональную связь). Связь, оцениваемая коэффициентами корреляции от 0,78 до 1, существует между теплопроводностью при комнатной температуре и удельным электросопротивлением в интервале температур 20—700°C. Это значит, что для указанных свойств, как и для некоторых других, по одному из определенных экспериментально свойств (например, при комнатной температуре) можно достаточно надежно рассчитывать все остальные. В качестве примера дальше приведены два эмпирических уравнения, позволяющие оценить теплопроводность сплавов (λ) по их удельному электросопротивлению (ρ) и модуль упругости (E) при температуре 600°C по модулю упругости, измеренному при комнатной температуре:

$$[\gamma_{20}] \text{ кал/}(\text{см} \cdot \text{с} \cdot \text{град}) = 1,29 - 0,21 \cdot [\rho] \text{ мкОм} \cdot \text{см};$$

$$[E_{600}] \text{ кгс/мм}^2 \cdot 10^3 = 0,14 + 0,75 \cdot [E_{20} \cdot 10^{-3}] \text{ кгс/мм}^2.$$

О том, что указанные свойства связаны определенной зависимостью в пределах сплава одного состава, хорошо и давно известно. Особенностью же данных выводов является распространение закономерностей на всю группу низколегированных сплавов, определение которых сформулировано выше. Последнее означает также

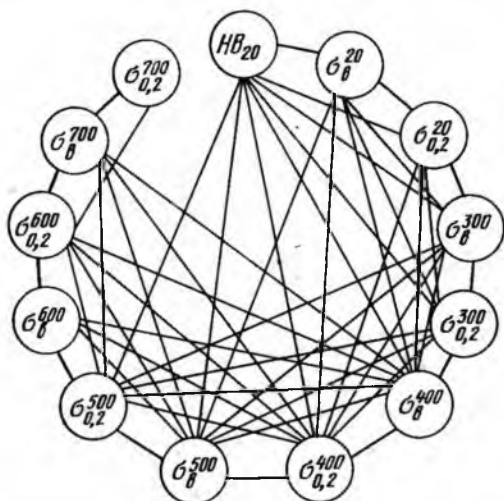


Рис. 25. Граф корреляционных связей между твердостью и пределами прочности и текучести в интервале температур

и то, что число определяемых физических и механических свойств сплавов, от которых зависят их служебные свойства, может быть значительно сокращено. Обнаруживают, например, хорошую корреляцию между собой такие свойства сплавов данной группы, как твердость при комнатной температуре, кратковременная (30 с) и длительная (60 мин) горячая твердость HV , пределы прочности и текучести, относительные сужение и удлинение, ударная вязкость. Однако в некоторых случаях связи не всегда оказываются прямыми. Выявляется также тенденция ослабления связей с повышением температуры испытаний. Например, предел прочности и твердость сплавов при комнатной температуре непосредственно связаны с подобными характеристиками только до 500°C , а свойства при 600°C и более высокой температуре надежно коррелируют только с такими же свойствами, определенными при температурах 400, 500°C и т. д. (рис. 25).

Из характеристик пластичности полностью закоррелированными между собой с высокими коэффициентами корреляции являются относительное сужение образцов, испытанных на разрыв при любой температуре испытаний; относительное удлинение в основном надежно связано с относительным сужением образца при одинаковой температуре.

3. КОРРЕЛЯЦИЯ МЕЖДУ СТОЙКОСТЬЮ ЭЛЕКТРОДОВ И ФИЗИЧЕСКИМИ И МЕХАНИЧЕСКИМИ СВОЙСТВАМИ ЭЛЕКТРОДНЫХ СПЛАВОВ

Как было показано, в настоящее время в качестве основного критерия стойкости электродов принято изменение размера его рабочей части в процессе сварки. Для точечной контактной сварки — это изменение диаметра контактной поверхности электрода (Δd) после выполнения определенного количества сварок (например, 5000 или 10000 сварных точек). Исследование возможности установления надежной связи стойкости электродов с какими-либо физическими или механическими свойствами электродных сплавов имеет большое теоретическое и практическое значение. С одной стороны, установление такой связи позволяет расширить представление о данной группе сплавов и определить тот необходимый комплекс свойств, который в наибольшей степени характеризует электродный материал, с другой — значительно более четко сформулировать основные требования к ним с тем, чтобы обоснованно попытаться контролировать качество электродов не только трудоемкими стендовыми испытаниями. Кроме того, это позволило бы направить работы, связанные с изысканием новых эффективных сплавов, в определенном направлении и прогнозировать работоспособность электродов в зависимости от марки электродного материала и условий его эксплуатации.

Учитывая большое разнообразие применяемых в промышленности видов контактной сварки, типов электродов, марок свариваемых материалов и режимов сварки, было решено при проведении такой работы сделать определенные ограничения с тем, чтобы при минимально возможной трудоемкости получить достаточно надежные и обобщающие результаты. Для этого в качестве вида сварки выбрали точечную, так как имен-

но она в отличие от других позволяла проводить эксперименты на достаточно большом количестве материалов с использованием довольно простых в изготовлении и небольших по размерам электродов (типа 0821—0113 по ГОСТ 14111—69). Кроме того, точечная сварка — наиболее распространенный в промышленности вид контактной сварки, а основные факторы, влияющие на стойкость электродов (температура, давление), являются характерными и для других видов контактной сварки (шовной, рельефной, стыковой).

Испытания проводили на сварочной машине МТ1202. Исследуемый материал — углеродистая сталь 08кп и нержавеющая сталь 12Х18Н9Т; толщина свариваемых листов 0,8—0,8 мм. Марки свариваемых материалов и их толщина являются типичными для сварки и также находят широкое распространение в промышленности.

Режимы точечной сварки при испытании электродов из углеродистой (I) и нержавеющей (II) сталей были следующие:

Основные параметры режима	I	II
Сварочный ток, А	9000	7200
Время прохождения тока, с . .	0,12	0,18
Усилие на электродах, кгс . .	300	430
Темп сварки, св/мин	200	60
Диаметр исходной контактной поверхности электрода, мм .	6,1—6,5	6,0—6,4

Темп сварки 200 св/мин при испытании электродов на углеродистой стали выбран из соображения ужесточения условий испытаний. Вследствие неизбежного при этом повышения температуры в контакте электрод—деталь, а также резкого увеличения числа циклов нагревов и охлаждений, приложения и снятия усилий значительно ужесточаются условия работы электродов. Разупрочнение металла наступает при этом быстрее и электроды требуют более частой зачистки, переточки и смены. Кроме того, такой темп сварки соизмерим с применяющимся в некоторых отраслях промышленности, например в автомобилестроении. Параллельно с испытаниями электродов на стойкость¹ проводили исследования основных физических и механических свойств сплавов, из которых были изготовлены эти электроды.

¹ Испытания стойкости электродов были проведены под руководством С. К. Слиозберга.

Определяли твердость, электропроводность и теплопроводность при комнатной температуре; удельное электросопротивление, предел прочности, условный предел текучести, истинное сопротивление разрыву, относительное удлинение, относительное сужение, модуль нормальной упругости, кратковременную (30с) и длительную (60 мин) горячую твердость, ударную вязкость в интервале температур 20—700°C, температуры начала и конца рекристаллизации; исследовали зависимости изменения механических свойств от температуры отжига и скорости деформации. Исследованиям были подвергнуты двадцать шесть композиций низколегированных медных сплавов, в том числе сплавы, указанные на с. 23.

Расчет коэффициентов парной корреляции и коэффициентов регрессии проводили на ЭВМ «Минск-32». Краткая блок-схема программы счета была приведена ранее¹.

При анализе результатов работ учитывали только связи, статистически значимые при доверительной вероятности 99,9%. Корреляционным анализом было установлено, что стойкость электродов связана в основном с прочностными свойствами (пределом прочности, пределом текучести, кратковременной и длительной твердостью). Если стойкость электродов при сварке углеродистой стали коррелирует с указанными свойствами, определенными при температурах 400, 500 и 600°C, то при сварке нержавеющей стали температурный диапазон закоррелированных механических свойств значительно расширяется и охватывает область температур до 700°C. Анализируя абсолютные значения коэффициентов корреляции и закономерность их изменения (по кривой с экстремумом), можно сделать вывод, что температуры рабочего конца электрода в месте его контакта со свариваемым материалом находятся в среднем для большинства сплавов в пределах 500—600°C при сварке углеродистой стали и 500—700°C при сварке нержавеющей стали, а температура всего электрода при установившемся режиме сварки находится в пределах 100—200°C.

Однако наибольшая корреляция служебных свойств электродных сплавов ($r=0,76—0,83$) обнаруживается

¹ Работа была проведена при участии Ф. С. Новика.

с характеристиками рекристаллизации и разупрочнения сплавов¹.

Электропроводность (теплопроводность) является одним из важнейших свойств электродных сплавов, от которого зависит рабочая температура электрода. Однако надежных связей служебных свойств с указанными при анализе не обнаружено. Причина этого заключается в том, что, во-первых, электропроводность (теплопроводность) изменялась от сплава к сплаву в сравнительно узких пределах (от 40 до 100% от Cu), а, во-вторых, всегда менее теплопроводный материал имел несравненно более высокие прочностные свойства в интервале температур, в том числе и после отжига. По этой же причине стойкость при сварке может быть одинаково высокой или одинаково низкой у сплавов, имеющих различное сочетание тепло- и электропроводности и прочностных свойств в интервале рабочих температур (а не при комнатной, как это считалось ранее).

Необходимо отметить также, что деление (хотя и условное) электродных сплавов на группы по электропроводности и твердости при комнатной температуре и связанные с этим делением рекомендации относительно применения сплавов, принадлежащих к той или иной группе, для сварки определенных марок материалов (например, легкие сплавы, углеродистые стали, нержавеющие стали и т. д. — ГОСТ 14111—69, [2]) представляются в настоящее время устаревшими и требуют уточнения. Хорошей иллюстрацией сказанному явились результаты проведенных испытаний электродов. Так, при сварке углеродистой стали практически одинаковую стойкость имели электроды из сплавов БрХЦр, БрНБТ и БрНХК, а при сварке нержавеющей стали — из сплавов БрХВЦр, БрНХК, БрНБТ и БрКБ, имеющих значительную разницу в электро- и теплопроводности при их общем высоком уровне (рис. 26). Такой вывод, естественно, справедлив лишь для случая использования водоохлаждаемых прямых электродов (см. рис. 2).

Роль электро- и теплопроводности сплавов значительно возрастает при их применении для изготовления

¹ Температура начала разупрочнения, температура конца разупрочнения, температура, при которой прочностные свойства сплавов уменьшаются на 50% по сравнению с исходным и полностью разупрочненным состоянием, и предел прочности сплавов, который соответствует этой температуре.

фигурных электродов (где хорошее охлаждение во многих случаях затруднено) или неохлаждаемых электродов малого диаметра. Кроме того, необходимо учитывать, что при проведении сравнительных испытаний оценивали только стойкость электродов, т. е. способность сохранять геометрические размеры рабочей части. Например, при оценке перспективности применения

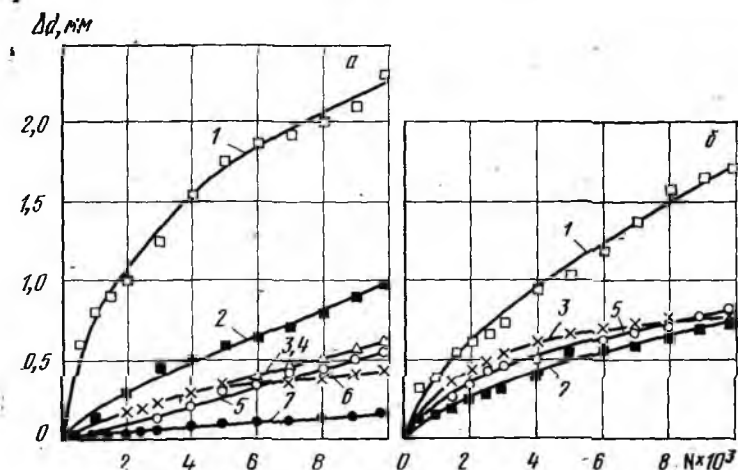


Рис. 26. Сравнительная стойкость электродов из хромовой бронзы и сплавов, показавших наилучшие результаты, при сварке нержавеющей (а) и углеродистой стали (б):

1 — БрХ; 2 — БрХЦр; 3 — БрНБТ; 4 — БрКБ; 5 — БрНХК; 6 — БрВЦр; 7 — БрКХКо

того или иного сплава для электродов контактной сварки углеродистой стали необходимо учитывать тенденцию к привариванию электродов из сплавов БрНБТ и БрНХК к поверхности свариваемых листов, что можно объяснить более высокой температурой в месте контакта электродов с поверхностью изделия по сравнению с более теплопроводными материалами (БрХ и БрХЦр).

Следует отметить также образование трещин на поверхности рабочей части электродов из сплава БрНБТ. Вообще появление трещин на поверхности электродов, изготовленных из низколегированных медных сплавов, явление, видимо, не характерное. Высокая пластичность абсолютного большинства электродных сплавов в широком температурном интервале компенсирует

напряжения, которые могут возникать в материале в результате перепада температур и циклического температурного воздействия. Из двадцати шести испытанных различных материалов трещины появились только на электродах из сплава БрНБТ, что, по-видимому, можно объяснить исключительно низкой его пластичностью в интервале рабочих температур. Теплопроводность материала в данном случае существенной роли не играет, так как электроды из сплавов, имеющих близкую к сплаву БрНБТ теплопроводность (БрНХК, БрКБ, БрКХКо), трещин на рабочей поверхности не имели.

В практике же промышленной эксплуатации электродов из других сплавов появление трещин на их контактной поверхности явление не редкое. Однако связывать это со свойствами сплава, режимом его обработки (если при закалке не произошло подплавление материала) вряд ли целесообразно. Причина этого явления, как правило, в неправильной эксплуатации электродов. Было замечено, что трещины в электродах в основном появляются после увеличения размера контактной поверхности больше допустимого предела (например, более 20%) [2].

Таким образом, корреляционный анализ показал, что стойкость электродов контактной сварки определяется главным образом уровнем предела текучести (предела прочности) в интервале температур, развивающихся на их рабочей поверхности, температурой начала разупрочнения (рекристаллизации) и интенсивностью протекания процессов разупрочнения в электродном сплаве, т. е. темпом разупрочнения ($\Delta\sigma/\Delta t$, где σ — показатель прочности, t — температура, после нагрева до которой определялась характеристика прочности) в результате воздействия температур. Такой показатель называют

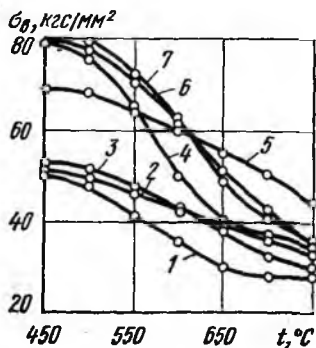


Рис. 27. Влияние температуры отжига в течение 1 ч на предел прочности дисперсионно твердеющих электродных сплавов при комнатной температуре:
1 — БрХ; 2 — БрХВЦр; 3 — БрХЦр;
4 — БрКБ; 5 — БрКХКо; 6 — БрНБТ; 7 — БрНХК

«устойчивостью против отжига» или «термической стабильностью».

Практически определить показатель «термической стабильности» материала помогают зависимости механических свойств сплавов от температуры отжига. Из приведенных на рис. 27 данных видны преимущества, например, сплавов БрХЦр и БрХВЦр перед хромовой бронзой или сплава БрКХКо перед сплавами БрКБ, БрНБТ, БрНХК.

ИЗМЕНЕНИЕ СТРУКТУРЫ ЭЛЕКТРОДОВ В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Для подтверждения «формальных» выводов относительно причин деформации электродов, который дал корреляционный анализ, А. И. Новиковым были проведены исследования изменений структуры и свойств электродов в процессе сварки и после нее. Электроды для этих исследований изготавливали из наиболее распространенного в настоящее время электродного материала — хромовой бронзы, подвергнутой общепринятой термомеханической обработке, включающей закалку с 980—1000°C; холодную деформацию на 60% и старение при 450°C 4 ч.

Анализ кривых зависимости изменения размера контактной поверхности электродов от числа выполненных сварок показал, что практически всегда наиболее интенсивное увеличение контактной поверхности наблюдается в начальный период сварки (первые 1000—2000 сварок), а затем, в течение дальнейшей работы, эта поверхность увеличивается практически пропорционально числу сварок. В результате измерения микротвердости по диаметру рабочей поверхности электрода и по его сечению установлено следующее. В процессе работы электрода происходит разупрочнение его рабочего конца, причем толщина разупрочненного слоя не превышает 1,5 мм (рис. 28). В центре контактной поверхности разупрочнение происходит заметно интенсивнее, чем по краям. После сварки 200 точек (свариваемый материал — углеродистая сталь, темп сварки 60 сварок в минуту) микротвердость центральной части поверхности электрода не превышает 80—85 кгс/мм², в то время как периферийная часть поверхности не изменила твердости по сравнению с исходной (155 кгс/мм²). Увеличение числа сварных точек до 5000

приводит практически к устранению разницы в твердости различных областей рабочего торца электрода. При этом увеличение диаметра контактной поверхности достигает величины 20—30%, т. е. электрод не пригоден к дальнейшей эксплуатации, и его необходимо менять или реставрировать с помощью переточки. Принципиально те же результаты были получены и в работе С. К. Слиозберга и П. Л. Чулошникова [2].

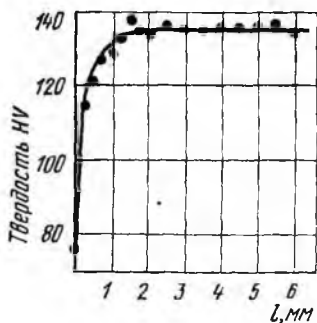


Рис. 28. Изменение твердости вдоль оси электрода после сварки 200 точек (материал электрода — сплав БрХ, l — расстояние от контактной поверхности)

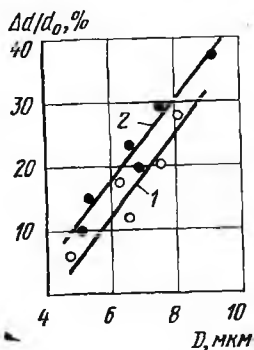


Рис. 29. Связь между средним диаметром рекристаллизованных зерен (D) в центральной части рабочего торца электродов и относительным изменением диаметра их контактной поверхности. Темп сварки, св/мин: 1 — 60; 2 — 150

Изменение контактной поверхности электродов и их свойств в процессе сварки находится в соответствии с изменением структуры электродного материала. Рекристаллизация в области, расположенной около продольной оси электрода, начинается уже после 200 сварок, а после 500 сварных точек первичная рекристаллизация в этой части электрода уже полностью заканчивается.

С увеличением числа сварок в процесс рекристаллизации материала вовлекаются новые слои контактной поверхности электрода от его центра к периферии. Первичная рекристаллизация периферийных слоев заканчивается после 2000 сварок.

С увеличением числа сварных точек рекристаллизованные зерна укрупняются. В результате анализа распределения зерен по размерам и изменения площади, занимаемой зернами одинакового размера в централь-

ной части рабочего торца электрода после сварки разного числа точек, выявлены следующие особенности. В процессе сварки происходит как первичная, так и собирательная рекристаллизация. Однако если при обычной статической собирательной рекристаллизации мелкие зерна постепенно исчезают и размер всех зерен стремится к некоторому конечному значению, то в случае рекристаллизации электродного материала этого не происходит: доля зерен всех размеров (по числу и по площади) при сварке свыше 2000 точек остается практически постоянной. При этом мелкие рекристаллизованные зерна располагаются по границам крупных рекристаллизованных зерен. Указанные особенности характерны для динамической рекристаллизации.

Период наиболее интенсивного развития собирательной рекристаллизации совпадает с наиболее интенсивным увеличением диаметра контактной поверхности электрода (от 0 до 1,5—2 тысяч сварок). Кинетика увеличения среднего диаметра рекристаллизованных зерен внешне аналогична кинетике увеличения диаметра контактной поверхности электрода, причем между указанными величинами наблюдается прямая корреляция. На рис. 29 $\Delta d/d_0 = (d_N - d_0)/d_0$, где d_0 — исходный диаметр электрода; d_N — диаметр электрода после сварки N точек.

Известно, что одним из наиболее эффективных барьеров для прохождения собирательной рекристаллизации в дисперсионно твердеющих сплавах являются выделения второй фазы. Чем меньше их размер и соответственно расстояние между ними, тем при одинаковой объемной доле выделений медленнее растут зерна при собирательной рекристаллизации. Связано это с тем, что мигрирующая граница, встречая на своем пути включения второй фазы, должна эти включения обогнуть и затем либо отрываться от них, либо увлекать их за собой. По этой причине при определенной установившейся температуре движущая сила собирательной рекристаллизации уменьшается и включения могут через некоторое время полностью затормозить рост зерна, если при этом не происходит их коагуляция.

Исследованиями тонкой структуры и ее изменениями, происходящими в рабочих торцах электродов в зависимости от числа выполненных сварок, было показано, что размер выделений увеличивается при их посто-

янной объемной доле от 50—100 Å (после сварки 200 точек) до 150—200 Å (после сварки 5000 точек). После сварки 5000 точек наблюдается протаскивание частиц второй фазы мигрирующими границами зерен, что приводит к возникновению цепочек выделений, вдоль которых расположены обедненные выделениями области. Такое перераспределение частиц должно обусловить понижение предела текучести в объеме зерен, поскольку появляются довольно широкие зоны, по которым может происходить беспрепятственное движение дислокаций, что в свою очередь должно ухудшать стойкость электродов.

Следовательно, можно считать, что стойкость электродов при сварке определяется, в конечном итоге, стабильностью размеров выделений второй фазы. В связи с этим заключением становится понятным, например, тот положительный эффект, который оказывает на стойкость хромовой бронзы дополнительное ее легирование малыми добавками циркония (до 0,1%, сплав БрХЦр). Как было показано, такое легирование значительно стабилизирует размер дисперсных выделений хрома, повышая тем самым температуру рекристаллизации и понижая скорость процессов разупрочнения в сплаве.

Таким образом, исследования изменений структуры и свойств электродов в процессе их эксплуатации подтвердили основные выводы корреляционного анализа относительно свойств электродных сплавов, определяющих стойкость электродов при контактной сварке.

СВЯЗЬ СТОЙКОСТИ ЭЛЕКТРОДОВ С ПОЛЗУЧЕСТЬЮ ЭЛЕКТРОДНОГО СПЛАВА

Существует мнение о том, что длительность эксплуатации электродных сплавов (стойкость электродов) в основном зависит от оптимального сочетания характеристик жаропрочности (пределов длительной прочности и ползучести) и электропроводности [15]. Авторы работы [2] также считают, что при сварке нержавеющей сталей и жаропрочных сплавов, сварке с высоким темпом или применении мягких режимов, когда на контактной поверхности электродов развиваются температуры (0,6—0,7) $T_{пл}$, доминирующим процессом, определяющим стойкость электродов, является ползу-

честь, контролируемая диффузией. При более низких температурах контакта (0,4—0,5) $T_{пл}$, т. е. при сварке на жестких режимах, сварке легких сплавов или сварке отдельными точками при длительных перегревах, считалось [2], что стойкость электродов определяется наряду с ползучестью еще термической и малоцикловой усталостью. В этой связи были сделаны рекомендации относительно выбора величины зерен в электроде в зависимости от условий сварки материалов: для высоких температур контакта электрод — свариваемое изделие — крупное зерно, для сравнительно низких температур — мелкое.

Однако рассматривать ползучесть как основной механизм, ответственный за деформацию рабочих торцов электродов при сварке малоуглеродистой стали с высоким темпом, нет оснований.

Во-первых, несложные расчеты показывают, что при сварке, например, с темпом 200 точек/мин за один сварочный цикл, продолжающийся 0,3 с, рабочий торец электрода находится в условиях, при которых в принципе могла бы протекать ползучесть, всего лишь менее 0,2 с. Суммарное время пребывания электродов под нагрузкой даже за 10 000 циклов составляет не более 30 мин, причем значительную часть этого времени рабочие торцы находятся при относительно низких температурах. За этот сравнительно малый промежуток времени рабочая часть электродов деформируется не более чем на 20% и электрод выходит из строя.

Во-вторых, механические напряжения, возникающие в электроде при сжатии, превышают предел текучести электродного материала при тех температурах, которые развиваются на рабочем торце электрода при сварке с высоким темпом (8—12 кгс/мм² при температурах до 700°C).

В-третьих, различный по величине средний размер зерна в дисперсионно твердеющих сплавах можно получить только или за счет повышения температуры нагрева под закалку, или варьируя степень деформации между закалкой и старением от 0 до 50—70%. И в том, и в другом случае изменение величины зерен сопровождается увеличением объемной доли выделений либо изменением кинетики старения и морфологии выделений, либо этими факторами, действующими одновременно. Поэтому однозначно связывать повышение

сопротивления ползучести и более высокую стойкость электродов из дисперсионно твердеющего сплава с укрупнением зерна не совсем корректно.

В-четвертых, анализ микроструктуры рабочих торцов электродов показал, что внутри рекристаллизованных зерен плотность дислокаций значительно выше, чем в случае статической рекристаллизации, происходящей при обычном рекристаллизационном отжиге. Это, вероятно, можно связать с тем, что в процессе сварки рекристаллизация происходит одновременно с пластической деформацией в температурном интервале «чуть ниже—чуть выше» температуры рекристаллизации, свойственной электродному сплаву. Деформация в таких условиях и позволяет увеличивать концентрацию дислокаций.

Таким образом, учитывая вышеизложенное, можно сделать вывод о том, что при сварке происходит пластическая деформация контактного торца электрода под действием напряжений, соизмеримых с пределом текучести электродного материала при температурах 600—700°C. При этом в контактном торце электрода происходит динамическая рекристаллизация, определяющая разупрочнение материала.

4. ВЫБОР ЭЛЕКТРОДНОГО СПЛАВА В ЗАВИСИМОСТИ ОТ МЕТОДА И ПАРАМЕТРОВ СВАРКИ СВАРИВАЕМОГО МАТЕРИАЛА

При разработке технологии сварки любого изделия, кроме выбора оптимальных форм и размеров электродов, необходимо правильно подобрать материал, из которого будут изготовлены электроды. Это обеспечивает получение сварных соединений требуемого качества при высокой производительности процесса. Многообразие типов контактной сварки, режимов и параметров процесса, марок и качества свариваемых деталей, условий производства и сварочного оборудования не позволяет точно определить наиболее эффективный электродный материал для каждого сварного изделия. Всегда в какой-то степени требуются исследования для уточнения состава и режимов обработки электродного сплава применительно к конкретным производственным условиям. Тем не менее необходимо сделать общие рекомендации по выбору электродных сплавов с учетом

специфики различных видов контактной сварки и основных типов свариваемых материалов.

Основными факторами, обуславливающими выбор электродного сплава, являются обеспечение формирования литого ядра (зоны) сварного соединения необходимого качества и размеров, достаточная формоустойчивость рабочей части электрода (стойкость электрода), отсутствие взаимного переноса металла электрода и свариваемой детали, природа упрочнения электродного сплава, доступность его приобретения и стоимость. Последний фактор является немаловажным, поскольку электрод является быстроизнашивающимся, расходным инструментом. При сравнении стоимости электродных сплавов, а следовательно, и электродов необходимо учитывать характер их износа, способ реставрации (переточка, зачистка, наплавка) или замены на новый и необходимое для этого время, производительность сварочной машины или линии. Во многих случаях (особенно в конвейерных линиях) затраты на более дорогой, но более стойкий материал окупаются сравнительно быстро.

В соответствии с данными, приведенными выше, отечественная промышленность располагает в основном десятью освоенными электродными сплавами, с помощью которых можно успешно решать большинство задач, стоящих перед современной сварочной техникой. Это не исключает дальнейшую работу над совершенствованием сплавов, а также использование в ряде случаев и других материалов.

При рекомендациях по выбору электродных сплавов для некоторых общих случаев сварки учитывали данные выполненных ранее работ [1—6], опыт зарубежных фирм и ряда передовых предприятий отечественной промышленности.

ТОЧЕЧНАЯ СВАРКА

Этот тип контактной сварки является наиболее распространенным, наиболее «электродоёмким» и наиболее разнообразным по параметрам сварки. Поэтому выбор оптимального состава электродного сплава в данном случае наиболее важен и наиболее сложен.

Основными общими техническими факторами, которые следует принимать во внимание при выборе электродного сплава для точечной сварки, являются тепло-

и электропроводность свариваемого материала, его твердость, температура плавления, химическая активность. Чем выше тепло- и электропроводность и ниже температура плавления свариваемого материала, тем выше должна быть тепло- и электропроводность сплава, из которого изготовлены электроды. Чем выше твердость свариваемого материала, тем выше должно быть это же свойство электродного сплава. Последнее не означает, что твердость электродного сплава должна быть выше твердости свариваемого материала. Ниже приведены рекомендации по выбору марки электродного сплава при сварке основных групп свариваемых материалов:

Свариваемые материалы	Марки электродного сплава
Алюминиевые и магниевые сплавы	БрСр, БрКд, БрХЦр-А
Малоуглеродистые и низколегированные стали	БрХ, БрХЦр, БрНХК, БрКБ
Нержавеющие стали и жаропрочные сплавы	БрКХКо, БрНХК, БрНБТ
Сплавы на медной основе (мельхиор, нейзильбер, фосфористая бронза, латуни)	БрХЦр, БрХВЦр
Никель и сплавы на никелевой основе	БрХВЦр, БрХЦр, БрНХК
Благородные металлы и сплавы на их основе в паре со сплавами на основе меди	БрХВЦр

Как правило, для каждой группы свариваемых материалов рекомендуется несколько электродных сплавов. Связано это с различными режимами сварки, с различием в толщине и свойствах (твердость, тепло- и электропроводность и др.) свариваемых материалов внутри каждой из групп и с различной дефицитностью электродных сплавов и применимостью в промышленности. Исключение из указанного представляют собой лишь сплавы, рекомендованные как электродные для сварки нержавеющей стали и жаропрочных сплавов. Учитывая результаты сравнительных испытаний, приведенных на рис. 26,а, лучшую стойкость при сварке нержавеющей стали имеет сплав БрКХКо. Однако сплав БрНБТ начали применять для этой цели значительно раньше и заменять его на более эффективный сплав в некоторых случаях может быть нецелесообразно. Во всяком случае, для такой замены

всегда требуется значительное время. Сплав БрНХК технологичнее в металлургическом производстве и заметно дешевле сплавов БрКХКо и БрНБТ, рекомендованных для сварки нержавеющей сталей и жаропрочных материалов.

При сварке легких сплавов, когда работоспособность электродов определяется не только деформацией рабочего конца (стойкостью), но и переносом материала электрода на свариваемое изделие, лучшие результаты по совокупности этих оценок имеет сплав БрСр при сварке изделий из технически чистого алюминия, мягких алюминиевых сплавов (например, типа АМцМ, АД1), тонкостенных изделий из алюминиевых и магниевых сплавов [2]; сплав БрХЦр-А при сварке изделий из сплавов типа АМг, Д16; сплав БрКд в известной мере универсален.

Сварка малоуглеродистых и низколегированных сталей наиболее многообразна по режимам и параметрам сварки. Именно эта особенность является основной причиной рекомендации нескольких электродных сплавов. Для жестких режимов сварки, сварки с высоким темпом (более 100 точек в 1 мин) и сварки в условиях интенсивного конвейерного производства весьма эффективен сплав БрХЦр, а для сварки с малым, средним темпом или отдельными точками наряду со сплавом БрХЦр следует рекомендовать как один из экономичных вариантов хромовую бронзу БрХ. Сплавы БрНХК и БрКБ целесообразно применять при мягких режимах сварки. В качестве контрэлектродов наиболее успешно применение сплавов БрНХК и БрХЦр, причем стойкость контрэлектродов из первого сплава в три-четыре раза выше.

При сварке изделий из материала различной толщины эффект смещения сварного ядра можно избежать, используя применение электрода с большим диаметром рабочей части со стороны более толстого листа (в том случае, когда разница в толщинах невелика) либо за счет применения разных электродных сплавов, например сплавов БрХЦр или БрХ со стороны толстого листа и сплава БрНХК со стороны тонкого.

Во всех случаях сварки правильно выбранный материал электрода вместе с его конструкцией и режимом сварки должен обеспечивать оптимальные размеры и качество соединения (см. табл. 2).

Шовная (роликовая) сварка — наиболее простой и экономичный способ получения герметического соединения тонколистовых материалов. Роликовые электроды в большинстве случаев более металлоемки, а замена износившегося электрода на новый, как правило, требует большего времени по сравнению с заменой электродов для точечной сварки. Поэтому к электродному материалу, используемому для шовной сварки, предъявляют повышенные требования.

При выборе электродного сплава для различных случаев шовной сварки ориентируются на те же факторы, что и при выборе сплавов для электродов точечной сварки, и рекомендации по их составам в зависимости от типа свариваемых материалов аналогичны. Однако следует отметить, что трудность получения необходимой степени деформации на крупногабаритных роликах из сплавов, упрочняемых наклепом (BrCr, BrKd), значительно повышает роль дисперсионно твердеющего сплава BrXЦр-А. Значительно возрастает эффективность применения и тех дисперсионно твердеющих сплавов, механические свойства которых мало зависят от деформации между закалкой и старением (сплавы BrНХК, BrКБ, BrНБТ).

Кроме того, специфика этого типа сварки во многих случаях делает значительно экономичным использование более дорогих, но более стойких сплавов (в частности, применение сплава BrXЦр, а не BrX).

РЕЛЬЕФНАЯ СВАРКА

Этот тип контактной сварки имеет особенность, заключающуюся в том, что одновременно осуществляется сварка в нескольких местах изделия, для чего на его поверхности заранее делают определенные рельефы (выступы). По этим рельефам и происходит сварка. Поскольку в данном случае электрический ток и тепло в месте сварки локализуются на выступах, а электрод имеет значительно большую рабочую поверхность, электродный материал может иметь меньшую тепло- и электропроводность по сравнению с другими типами контактной сварки. Вместе с тем он должен иметь высокие прочностные свойства, так как удельные давле-

ния на электрод при рельефной сварке, как правило, сравнительно высокие.

Все это позволяет успешно использовать при рельефной сварке такие электродные материалы, как БрНХК, БрКБ, БрНБТ, БрКХКо.

СТЫКОВАЯ СВАРКА

При стыковой сварке (оплавлением, сопротивлением) к электродному материалу предъявляют требования, важнейшими из которых являются высокие твердость, прочность, износостойкость. Тепло- и электропроводность в данном случае может быть значительно меньшей по сравнению, например, с точечной или шовной сваркой, так как плотность тока при стыковой сварке значительно ниже. В качестве примера эффективного использования электродных материалов можно привести сплавы БрКХКо и БрКБ при сварке звеньев высокопрочных цепей, сплав БрНБТ при сварке лент из различных материалов, сплав БрНХК при сварке стальных труб. Применение сплава БрНХК в трубосварочном производстве вместо хромовой бронзы позволило увеличить производительность станов на 4—5% при одновременном улучшении качества.

ГЛАВА III

ТЕХНОЛОГИЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ ЭЛЕКТРОДНЫХ СПЛАВОВ И ЭЛЕКТРОДОВ

Основные параметры технологии изготовления полуфабрикатов из электродных сплавов и электродов приведены в табл. 9. Вместе с тем независимо от составов электродных сплавов они характеризуются рядом особенностей, которые отличают их от других сплавов на медной основе и которые необходимо учитывать при разработке и освоении промышленной технологии их производства.

ТАБЛИЦА 9
ОСНОВНЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛУФАБРИКАТОВ ИЗ ЭЛЕКТРОДНЫХ СПЛАВОВ И ЭЛЕКТРОДОВ [1, 2, 5, 22, 27, 47]

Сплав	Температура, °С					Суммарная степень холодной деформации ¹ перед старением, %
	литья	закалки	старения	промежуточного отжига	горячего деформирования ² , °С	
BrCr	1150—1180	—	—	500—600	950—700	20—70
BrKd	1150—1180	—	—	500—600	800—750	20—70
BrX	1250—1300	980—1000	440—460	650—700	950—700	0—50
BrXЦр	1250—1300	980—1000	450—470	650—700	930—700	0—50
BrXЦр-A	1220—1250	950—980	450—470	650—700	930—700	0—50
BrXBЦр	1300—1350	930—950	460—475	700—750	930—700	40—70
BrKB	1220—1250	900—950	450—470	650—700	950—750	0—50
BrHBT	1220—1250	960—980	480—500	700—750	950—750	—
BrHXK	1250—1300	900—950	460—480	700—750	950—700	—
BrKXKo	1300—1350	940—960	470—500	750—800	950—700	0—50

Примечания: 1. Продолжительность выдержки полуфабрикатов и электродов при температуре, от которой происходит заковка, устанавливается от 30 до 60 мин в зависимости от габаритов полуфабрикатов и массы садки.

2. Продолжительность отжига 1—2 ч.

3. Продолжительность старения выбирают в зависимости от конкретных условий эксплуатации электродов.

¹ Прокатка, прессование.

² Прокатка, волочение, штамповка.

4. ПЛАВКА СПЛАВОВ, ЛИТЬЕ СЛИТКОВ И ЭЛЕКТРОДОВ

Плавку электродных сплавов, как и других низколегированных медных сплавов, в принципе можно осуществлять в любых печных агрегатах под слоем древесного угля или сажи, в атмосфере инертного газа, под флюсом, в вакууме, электрошлаковым методом. Метод плавки и печной агрегат обычно выбирают на основе совместного анализа ряда факторов, важнейшими из которых являются объем производства, требования к качеству полуфабрикатов (следовательно, слитков или литых деталей), экономика производства, наличие конкретного оборудования и т. д.

Однако независимо от метода плавки и плавильного агрегата присутствие в составе этих сплавов легирующих элементов с большим сродством к кислороду (Сг, Ti, Zr, Be, V, Si) и во многих случаях весьма малые допуски на легирование (иногда $\pm 0,03\%$), а также требование к чистоте сплавов по примесям, главным образом для сплавов с относительно высокой проводимостью (см. табл. 8), определяют некоторые особенности технологии. Одной из таких особенностей является целесообразность во многих случаях применения в шихту двойных или более сложных (комплексных) медных лигатур. Рациональность применения лигатур обусловлена необходимостью надежного воспроизведения заданного состава сплава, снижения температуры перегрева расплава, сокращения энергетических затрат, уменьшения цикла плавки, а следовательно, увеличения производительности плавильных агрегатов, снижения угаров дорогостоящих легирующих компонентов и зашлакованности плавильной ванны. Несмотря на то что сам факт применения лигатур определяет в ряде случаев вообще возможность воспроизведения в промышленных условиях необходимой композиции сплава (например, сплава БрХВЦр), а их качество во многом определяет качество самих сплавов, вопросам оптимизации технологии их изготовления до сих пор не уделяется достаточного внимания. Кроме того, необходимость применения лигатур при выплавке сплавов цветных металлов, в частности низколегированных сплавов на медной основе, не является общепризнанной. До сих пор обсуждаются не только методы, параметры технологии изготовления лигатур, их оптимальные составы,

но и целесообразность их использования вообще [29, 30].

В настоящее время нет сомнений относительно технической и экономической целесообразности изготовления и применения для легирования сталей ферросплавов, мировое производство которых, по данным работы [30], достигло величины порядка 15 млн. т в год.

Этот богатый опыт может быть использован и прежде всего для централизованного изготовления лигатур с наиболее распространенными легирующими элементами (в первую очередь такими, как Cr , Zr , Cd , Ti). Решение этого вопроса является одним из основных направлений совершенствования технологии и развития производства проката цветных металлов [31].

При изготовлении медных лигатур для плавки электродных сплавов и собственно электродов контактной сварки следует обратить внимание на некоторые общие требования к лигатурам:

1. Основа лигатуры должна соответствовать основе сплавов, выплавляемых с ее применением (при плавке медных сплавов применяемая лигатура должна быть на медной основе). В противном случае весьма вероятно осложнение процесса растворения легирующих элементов в расплаве вследствие образования труднорастворимых или даже практически нерастворимых химических комплексов. Особенно возрастает эта опасность в случае применения комплексных лигатур [29], не содержащих меди.

2. Состав и распределение легирующих компонентов в лигатуре должны обеспечивать, с одной стороны, надежное получение заданного состава сплава, а с другой — достаточную производительность печных агрегатов при производстве и лигатуры, и сплава.

3. Температура плавления лигатуры должна быть не выше максимальной температуры перегрева медного расплава до введения легирующих или после.

4. Состав и размеры слитков лигатуры должны позволять без затруднений проводить операцию ее размельчения на куски, удобные для дальнейшей расшивки (дробление, резка, прокатка и резка).

Особое внимание следует обращать на контроль качества лигатуры, который должен включать химический анализ на основные компоненты (при разработке тех-

нологии изготовления лигатуры — по высоте и сечению слитка), а также контроль неметаллических включений металлографическим или фрактографическим методами, для чего необходима соответствующая шкала эталонов.

При рассмотрении составов современных электродных сплавов, выпускаемых или рекомендованных к производству отечественной промышленностью, обращает на себя внимание тот факт, что все они в сумме содержат в качестве легирующих десять компонентов (Ag, Cd, Cr, Zr, V, Co, Be, Ni, Si, Ti). Естественно, что обязательно применять лигатуры для введения всех этих элементов в медь нецелесообразно и нерационально. Введение в медь таких элементов, как Ni, Co, Ag, в большинстве случаев и кремния в чистом виде, практически не связано с какими-либо осложнениями. Обычно точность попадания в заданный состав по этим элементам не зависит от условий плавки, а определяется точностью расчета и подготовки шихты.

Остальные легирующие элементы электродных сплавов необходимо вводить в расплав в виде лигатур. Хорошие результаты при производстве, например, сплава БрНБТ дает использование вместо лигатуры Cu—Be отходов бериллиевой бронзы [5] БрБ2; БрБ2,5; БрБНТ1,9; БрБНТ 1,7 с «лигатурным» для этого сплава содержанием бериллия (около 2%).

Основная технологическая трудность при плавке сплавов Cu—Cd связана с нестабильностью получения оптимального состава из-за низкой температуры кипения кадмия (767°C). Упругость паров кадмия при температуре около 1000°C составляет 10588 мм рт. ст., или примерно 14 ат, что приводит к потерям более чем 50% его при введении в расплавленную медь. Наиболее рациональная, на наш взгляд, технология изготовления лигатуры Cu—Cd предложена А. В. Курдюмовым [32, 33]. Способ основан на одновременном протекании процессов растворения меди в расплавленном кадмии и диффузии его в медь в жидком и газообразном состояниях. Для осуществления процесса определенные навески меди и кадмия одновременно помещают в графитошамотовый тигель, который закрывают крышкой (можно использовать дно вышедшего из строя такого же тигля). Щель между крышкой и тиглем замазывают пастообразной смесью, состоящей из огнеупорной глины, кварцевого песка, волокнистого асбеста, воды и

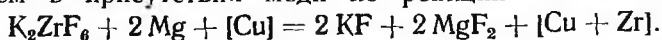
жидкого стекла. Состав и пропорция компонентов этой смеси произвольны. Закрытый тигель помещают в муфельную или шахтную печь сопротивления, пламениую или индукционную и нагревают до 650—700°C. Для садки массой 20 кг достаточно выдержка в течение 30—40 мин [34]. В этом случае получается лигатура, содержащая 50% Cd. Для получения более бедной по кадмию лигатуры (30 и 20%) процесс следует проводить аналогично описанному выше с той лишь разницей, что после выдержки в течение 30 мин при 650—700°C тигель нагревается до 850 или 950°C соответственно для получения лигатуры, содержащей 30 и 20% Cd. Потери кадмия при изготовлении лигатуры таким методом составляют не более 1%. Применение лигатуры Cu—Cd при плавке сплавов Cu—Cd позволяет сократить потери кадмия в несколько раз, значительно увеличив тем самым вероятность получения заданного состава. При этом, естественно, получается ощутимый экономический эффект.

Лигатуры Cu—Cr, Cu—V, Cu—Ti и Cu—Zr в принципе можно получить и в открытых печах, в частности как это характерно для лигатуры Cu—Cr [36]. Однако наиболее качественная лигатура получается в вакуумных индукционных высокочастотных печах. Даже если учитывать, что серийное промышленное производство всех электродных сплавов, за исключением сплава БрХВЦр, в настоящее время осуществляется в открытых индукционных канальных печах, изготовление лигатур для этого производства должно осуществляться в вакууме. В противном случае вследствие значительного содержания окислов хрома в лигатуре открытой плавки зашлаковывается печь для выплавки сплава, а расход такой лигатуры на плавку увеличивается почти вдвое по сравнению с расчетным содержанием хрома в сплаве и условным его содержанием в лигатуре. При плавке более сложных, чем двойные, сплавов (например, БрЦХр) применение лигатуры Cu—Cr низкого качества (открытой плавки) приводит к потерям циркония (главным образом в результате его взаимодействия со шлаком) до 90%. Кажущаяся экономичность открытой плавки по сравнению с вакуумной и соображения по поводу нерентабельности применения сравнительно бедных лигатур [29] не могут быть справедливыми для всех случаев.

Лигатуры Cu—Cr и Cu—V приготавливают в вакуумных индукционных высокочастотных печах по сходной технологии: расплавление и перегрев меди до температуры 1350—1400°C; введение кускового хрома по частям (размер кусков хрома не должен превышать 20—25 мм в поперечнике); выдержка расплава для растворения хрома (время выдержки зависит от веса садки) с одновременным повышением его температуры до 1550—1650°C; захлаживание расплава до температуры литья; литье. Оптимальное содержание хрома в лигатуре Cu—Cr 8—10%, а в лигатуре Cu—V ванадия 4—6%. Обе лигатуры пластичны, легко прокатываются как в горячем, так и холодном состояниях. Обе лигатуры склонны к ликвации и поэтому их следует отливать сравнительно небольшими слитками массой 15—25 кг. Последнее не означает, что соответственно такой же массы должна быть и плавка. В перспективе можно считать оптимальным литье всех лигатур в движущейся по конвейеру набор изложниц.

Лигатуры Cu—Ti и Cu—Zr также готовят в вакууме. В качестве шихты с равным успехом можно использовать как компактные компоненты, так и титановую и циркониевую губку. В отличие от лигатур Cu—Cr и Cu—V указанные лигатуры более богаты легирующим компонентом (содержат 30—40% Ti и 30—50% Zr), отличаются равномерным их распределением по высоте и сечению слитка, хрупки и сравнительно легко дробятся, не требуют при изготовлении высоких температур перегрева расплава, а следовательно, более технологичны.

Цирконийсодержащие электродные сплавы относятся к числу самых перспективных. С ростом их производства соответственно возрастет и потребность в лигатуре Cu—Zr. Поэтому использование для изготовления лигатуры чистого циркония или даже циркониевой губки может оказаться не всегда экономически оправданным. В этой связи заслуживает внимания процесс получения такой лигатуры, основанный на восстановлении циркония из его соли (фторцирконата калия) магнием в присутствии меди по реакции



В отечественной литературе промышленное опробование магниетермического метода производства лигатуры Cu—Zr описано в работе [35]. Таким методом надежно можно получать лигатуру с 10—15% Zr.

Шихту, состоящую из меди, магния (лигатуры Cu—Mg), фторцирконата калия, загружают в графитовый тигель слоями (сверху и снизу фторцирконат калия). Тигель помещают в высокочастотную индукционную печь и нагревают до $1200\text{—}1250^\circ\text{C}$. В процессе всего цикла плавки содержимое тигля необходимо перемешивать графитовым стержнем. Вся плавка (восстановительная часть процесса) продолжается $40\text{—}50$ мин (для тигля емкостью, например, 500 кг). Извлечение циркония в лигатуру при этом методе плавки составляет $76\text{—}82\%$, а выход годного $90\text{—}95\%$. При правильном ведении процесса остаточное содержание магния в лигатуре не превышает $0,02\text{—}0,03\%$. Вообще в зависимости от содержания компонентов в шихте и полноты протекания реакции восстановления фторцирконата калия магнием можно получать по существу любое содержание магния в лигатуре или, другими словами, тройную лигатуру Cu—Zr—Mg . Это свойство процесса можно рационально использовать в случае, если необходимость магния в сплаве технически обоснованна. Если в сплаве по каким-либо соображениям необходим, например, кальций, то процесс восстановления циркония в принципе можно проводить и кальциетермическим методом, и тогда получаемая лигатура Cu—Zr—Ca может оказаться незаменимой и наиболее экономичной для применения при производстве сплава, имеющего в составе одновременно и цирконий, и кальций.

Комплексные лигатуры на основе меди, т. е. лигатуры, содержащие более одного легирующего элемента, — это один из наиболее эффективных способов влияния на экономические показатели производства слитков из электродных сплавов. В настоящее время имеется некоторый опыт производства и применения при изготовлении сплавов таких лигатур, как Cu—Zr—Cr , Cu—Zr—V , Cu—Ni—Be , Cu—Ni—Cr .

При этом технология производства комплексных лигатур практически не отличается по основным параметрам от технологии изготовления соответствующих двойных лигатур. Кроме того, введение в лигатуру некоторых элементов (Ni , Zr) значительно ускоряет процесс растворения хрома и ванадия в жидкой меди¹.

¹ Требуют для получения качественной лигатуры меньших температур и времени.

Другой важной особенностью плавки низколегированных медных сплавов является подготовка бескислородного медного расплава перед вводом легирующих. Раскисление меди в зависимости от качества исходной шихты и метода плавки может осуществляться как углеродом (тигель, компонент защитного покрова при плавке), так и металлическими раскислителями. В последнем случае необходимо иметь в виду, что остаток раскислителя в сплаве может в большей или меньшей степени уменьшить электропроводность сплава и увеличить его горячеломкость (см. рис. 10). В этой связи, учитывая составы электродных сплавов, следует отметить, что все они, за исключением сплава системы Cu—Ag, имеют в своем составе элементы с высокой раскислительной способностью, а количество элемента, необходимое для обеспечения остаточного кислорода в расплаве на уровне 0,001%, ничтожно мало даже по сравнению с количеством легирующих элементов в низколегированном сплаве (рис. 30). Кроме того, если иметь в виду, что при тигельной плавке (открытой или вакуумной) применение графита в качестве материала плавильной емкости практически всегда наиболее эффективно, а при плавке в индукционной канальной печи

после отливки слитка всегда должна оставаться часть расплава (условие, необходимое для воспроизводства процесса), которая содержит те же легирующие элементы, то введение специальных раскислителей может оказаться лишней операцией.

Медносеребряные сплавы обычно раскисляют фосфором. Количество фосфора, необходимое для раскисления, колеблется от 0,005 до 0,01% в зависимости от качества шихты. Учитывая приве-

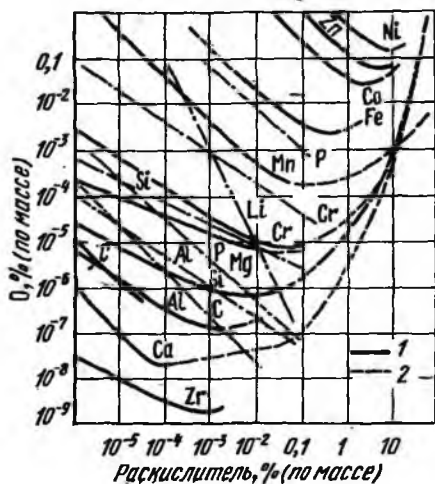


Рис. 30. Изотермы концентрации кислорода в меди в зависимости от содержания раскислителей при 1200°C (1) [37] и при 1400°C (2) [29]

денные на рис. 30 данные по раскисляющей способности различных элементов, можно применять для медного расплава и другой, более эффективный раскислитель, например литий. Хорошие результаты получаются при раскислении меди бором [38].

При плавке сплавов большое значение имеет порядок загрузки шихты. Наиболее активные элементы вводят в расплав в последнюю очередь. При этом необходимо учитывать, что независимо от того в чистом виде вводят легирующий элемент или в лигатуре, метод его введения должен обеспечивать непосредственное соприкосновение с зеркалом металла, а не со шлаком.

При литье слитков или фасонных отливок из электродных сплавов необходимо учитывать, что все они характеризуются узким интервалом кристаллизации, а следовательно, склонны к образованию концентрированных усадочных раковин. Поэтому технология литья и конструкция литейной формы должны предусматривать необходимое в этом случае питание усадки при затвердевании отливки. Температуру литья практически для всех сплавов такого типа устанавливают в пределах 1150—1300°C в зависимости от состава сплава, сложности отливки, метода плавки и литья. В остальных требованиях к конструкции литейной формы и технологии литья не отличаются от требований, предъявляемых к сплавам другого состава или основ, важнейшим из которых является обеспечение направленной кристаллизации, позволяющей получать наиболее плотные и качественные отливки. Слитки из кадмиевой бронзы отливают наполнительным методом в водоохлаждаемую изложницу, а из всех других сплавов — полунепрерывным методом.

2. ОБРАБОТКА ДАВЛЕНИЕМ

Обработка давлением всех применяемых в настоящее время электродных сплавов как в горячем, так и в холодном состояниях практически не вызывает каких-либо затруднений. Сравнительно высокие пластические свойства сплавов в широком температурном интервале обеспечивают хорошую их технологичность на всех операциях горячей и холодной прокатки, прессования, волочения,ковки, штамповки. Температурный интервал горячего деформирования практически всех сплавов на-

ходится в пределах 700—950°C. Исключение составляют сплавы, содержащие цирконий, для которых нагрев под обработку несколько ниже, и сплав БрКд, характеризующийся сравнительно узким интервалом горячей обработки.

На рис. 31 приведены данные, иллюстрирующие влияние холодной деформации на прочность и пластичность меди и медных низколегированных сплавов. Независимо от состава указанные свойства сплавов рас-

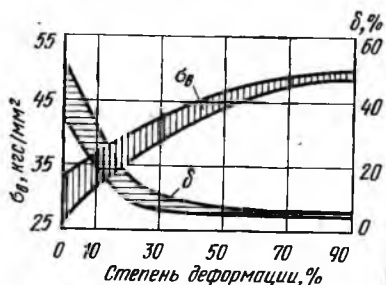


Рис. 31. Влияние холодной деформации на механические свойства меди и низколегированных медных сплавов

полагаются в довольно узких интервалах. Поэтому при определении технологических схем деформирования какого-либо сплава ориентиром могут служить схемы обработки подобных полуфабрикатов из меди или другого сплава такого же типа. Вообще выбор таких параметров деформирования, как дробность деформации, степень дефор-

мации по проходам, суммарная степень деформации и т. д. в данном случае больше зависит от возможностей соответствующего оборудования, чем от состава сплавов.

Как было показано, холодная деформация для электродных сплавов является одной из основных технологических операций, от которой зависит не только определенная и наиболее рациональная форма полуфабриката или электрода, но и механические и эксплуатационные свойства. Для сплавов, упрочненных холодной деформацией (БрСр и БрКд), последняя вообще является единственной определяющей операцией, от которой зависят конечные свойства материала. Для дисперсионно твердеющих сплавов от проведенной холодной деформации между закалкой и старением также зависят многие свойства, особенно в том случае использования сплавов, когда температуры, развиваемые на рабочем торце электрода, не превышают температур старения сплавов (температур разупрочнения), т. е. находятся в интервале 400—500°C (в зависимости от состава сплава). Это наблюдается при сварке на жестком режиме со сравнительно малым темпом (не более 50—60 то-

чек в 1 мин) или при сварке отдельными точками, например на многоточечных машинах.

При повышении температуры на рабочем торце электрода в процессе его эксплуатации выше 500—600°C холодная деформация между закалкой и старением может оказать и отрицательное влияние. Поэтому при определении параметров технологии изготовления электродов или выборе состояния поставки полуфабрикатов из электродного материала, используемых для производства электродов для сварки с высоким темпом (150—200 точек в 1 мин), сварки на мягких режимах, необходимо это учитывать. В данном случае наиболее стойкими могут оказаться электроды, изготовленные из материала, обработанного по схемам: литье слитка — горячая деформация — закалка — старение или литье слитка — закалка — старение.

Обе схемы в основном относятся к электродам, которые изготавливают точением либо из прутковой, либо плоской заготовки. В случае производства электродов методом штамповки (схема изготовления показана ниже) холодная деформация является практически обязательной частью процесса. При этом следует обратить внимание на наличие значительной неравномерности деформации в различных частях электрода. Особенно резко неравномерность деформации проявляется при изготовлении электродов, диаметр рабочего конца которых незначительно отличается от диаметра средней части электрода (см. рис. 1). При изготовлении таких электродов методом штамповки основная деформация происходит в месте, непосредственно примыкающем к каналу охлаждения (средняя часть электрода и посадочный конус). Рабочая же часть электрода практически остается без деформации. На рис. 32 показано различие в микроструктуре различных частей электрода из сплава БрХЦр, изготовленного методом штамповки по схеме закалка — штамповка — старение. На том же рисунке показана для сравнения микроструктура, характерная для всех частей электрода, полученного точением из прутка сплава БрНХК, прошедшего закалку и старение (без промежуточной холодной деформации). Эффект неравномерности деформации при штамповке электродов необходимо учитывать при определении оптимального варианта сочетания: свариваемый материал — параметры сварки — тип электрода — метод

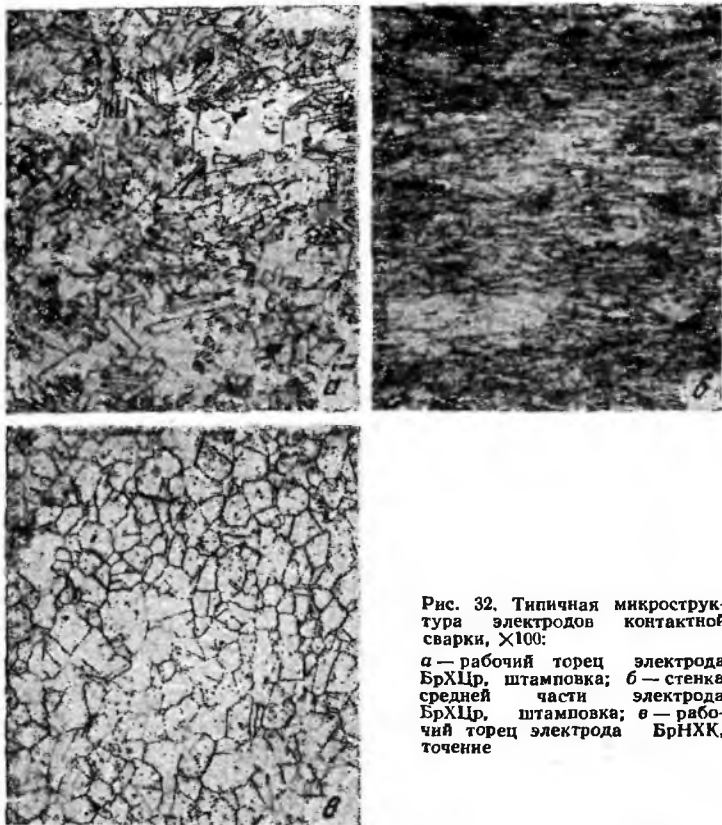


Рис. 32. Типичная микроструктура электродов контактной сварки, $\times 100$:

а — рабочий торец электрода БрХЦр, штамповка; *б* — стенка средней части электрода БрХЦр, штамповка; *в* — рабочий торец электрода БрНХК, точение

изготовления электрода — стойкость электрода. В этой связи, например, многоточечные сварочные машины целесообразно снабжать штампованными электродными насадками колпачкового типа (см. рис. 3). Конструкция колпачка позволяет деформировать практически весь объем материала, в том числе и примыкающий непосредственно к рабочей поверхности, а в соответствии с вышеизложенным это может значительно повысить его эксплуатационные свойства в конкретных условиях.

3. ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

В процессе производства полуфабрикатов из электродных сплавов возможно применение термической обработки двух основных видов: рекристаллизационного от-

жига и закалки с последующим старением. Первый вид термической обработки применительно к электродным сплавам встречается довольно редко, так как обычно технология изготовления полуфабрикатов предусматривает осуществление холодной деформации только с необходимой для приобретения требуемых свойств степенью.

Для этого до предвыходного размера осуществляется горячая деформация (прокатка, прессование). При использовании дисперсионно твердеющих сплавов закалку осуществляют также после горячей прокатки. Исключение составляет производство полуфабрикатов сравнительно малых размеров (прутки небольшого диаметра, проволока, листы), применяемых для изготовления миниатюрных, в основном неохлаждаемых электродов. В этом случае между операциями холодного деформирования проводят отжиг для снятия наклепа. Отжиг позволяет проводить последующую пластическую деформацию более интенсивно, т. е. с большей степенью за проход. Температуру отжига выбирают на основании графиков температурной зависимости механических свойств (рис. 27), и она должна быть немного выше температуры конца рекристаллизации сплава. Для электродных сплавов температура рекристаллизационного отжига находится в сравнительно узких пределах: для сплавов БрСр и БрКд 500—600°C, а для дисперсионно твердеющих сплавов 650—700°C. Продолжительность отжига 1—2 ч в зависимости от массы заготовки в печи.

Второй вид термической обработки является основной технологической операцией производства как полуфабрикатов из дисперсионно твердеющих электродных материалов, так и электродов из этих сплавов, если последние изготовлены методом штамповки. Закалка и старение для таких сплавов совершенно необходимы. В результате закалки приобретает требуемое сочетание физических, механических и эксплуатационных свойств. Без закалки применение дисперсионно твердеющих сплавов нецелесообразно. Температура, с которой осуществляют закалку электродных сплавов, независимо от их состава ограничивается сравнительно узким интервалом — чаще всего 930—1000°C. Выдержка при этой температуре составляет обычно от 30 до 60 мин, а охлаждение — в холодной воде.

Повышение температуры закалки некоторых сплавов, в основном хромовой и хромоциркониевой бронз, соответственно до 1030—1050 [39] и 1020°C [27] может обеспечить значительное (примерно на 30 и 10%) повышение прочностных свойств в интервале температур 20—450°C после соответствующего старения. Связано это с тем, что составы сплавов обеих систем находятся практически в двухфазной области (см. рис. 11, 12) вплоть до температуры плавления. Поэтому повышение температуры закалки увеличивает концентрацию легирующих элементов в твердом растворе в соответствии с увеличением предела растворимости. При последующем старении увеличивается объемная доля выделений второй фазы и повышаются прочностные свойства сплава. Однако на практике этот эффект используют довольно редко, так как он имеет и ряд отрицательных факторов, основными из которых являются необходимость в совершенных промышленных высокотемпературных печах, повышение требований к скоростям охлаждения, опасность оплавления.

Чрезвычайно перспективным может оказаться сравнительно редко применяемое в настоящее время совмещение закалки с литьем в водоохлаждаемые кристаллизатор или металлические формы [18]. Ориентируясь на «закалку из жидкого состояния», следует иметь в виду, что не все электродные сплавы имеют высокую прокаливаемость и, таким образом, не все с равным успехом могут без потери в свойствах обрабатываться из литого состояния. К сплавам, имеющим высокую прокаливаемость, можно отнести бронзы БрНХК и БрНБТ.

Старение всех электродных сплавов осуществляют обычно в интервале температур 440—500°C в течение 2—6 ч.

Таким образом, низколегированные сплавы, к числу которых относятся и электродные сплавы, характеризуются целым рядом технологических особенностей, что определяет в ряде случаев общий подход при разработке начальных параметров производства (плавки сплавов, литья слитков, горячей и холодной обработки давлением, термической обработки). Однако это совсем не значит, что параметры обработки одного сплава будут оптимальными и для другого. Уточнение отдельных параметров применительно к конкретному сплаву, конкретному виду продукции является обязательным.

4. ВЛИЯНИЕ СОСТАВА СПЛАВА И ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ПОЛУФАБРИКАТОВ НА РАБОТОСПОСОБНОСТЬ ЭЛЕКТРОДОВ

Когда выбрана система, лежащая в основе сплава, определен состав по легирующим компонентам, обеспечивающий оптимальное сочетание требуемых свойств, определены основные параметры технологии изготовления продукции из этого сплава, приступают к освоению его промышленного производства. Для этого необходима работа, в результате проведения которой устанавливаются пределы легирования, предельное содержание допустимых примесей, допустимые предельные отклонения от оптимальных температурно-временных и других параметров плавки, литья, горячей и холодной обработки давлением, термической обработки, определяют методы контроля качества продукции и точность этих методов. Другими словами, создается промышленный технологический процесс производства продукции (полуфабрикатов или готовых электродов). На этапе освоения промышленной технологии вступают в противоречия состав сплава с комплексом характеризующих его свойств и возможности конкретного производства¹. Эти противоречия заключаются в том, что, как правило, оптимальное сочетание различных свойств имеет вполне определенный состав сплава, обработанный по вполне определенным режимам. Любые отклонения от этих строго определенных параметров приводят во многих случаях к снижению свойств. С этой точки зрения предельные отклонения от заданных параметров должны быть минимальными. С производственной же точки зрения чем больше допустимые отклонения, шире различные пределы, тем более технологичен материал, выше рентабельность его производства (производительность труда, выхода годного и т. д.). Таким образом всегда возникает задача свести эти противоречия к минимуму, когда различные вариации параметров в пределах заданного технической документацией не приводят к снижению свойств сплавов ниже гарантированного высокого уровня.

¹ Наличие оборудования, уровень культуры производства, квалификация исполнителей, обеспеченность надежными средствами контроля и т. д.

На рис. 33 приведены кривые распределения стойкости электродов, изготовленных из трех различных сплавов. Отклонение от среднего значения стойкости, которое значительно изменяется от сплава к сплаву,

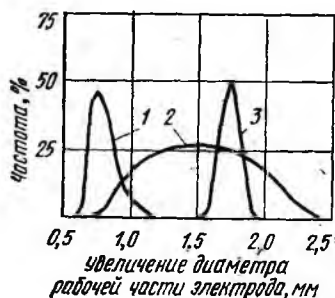


Рис. 33. Распределение стойкости электродов при контактной точечной сварке углеродистой стали (10 000 сварок):

1 — БрХЦр; 2 — МЦ-5А (0,20—0,40% Сг, 0,15—0,35% Zr, Cu ост.); 3 — БрХ

хотя и косвенно, но все же характеризует качество материала, стабильность его свойств, технологичность и степень освоенности в металлургическом производстве. Наименьшие отклонения от средних значений стойкости оказались у сплавов (БрХ и БрХЦр), производство различных полуфабрикатов из которых давно освоено, а пределы их легирования обеспечивают достаточно надежную и стабильную работоспособность электродов. Сплав МЦ-5А (0,2—0,4%

Сг, 0,15—0,35% Zr, ост. Cu), рекомендованный как электродный материал [5], практически не освоен в промышленности и уступает значительно в стабильности стойкости двум другим сплавам при контактной точечной сварке углеродистой стали. По-видимому, это связано с недостаточно обоснованным выбором пределов его легирования, т. е. с составом сплава. Это относится и к известному электродному сплаву БрНБТ. Как отмечают авторы работы [40], электроды, изготовленные из указанного сплава с содержанием легирующих элементов на нижнем пределе, не обладают высокой стойкостью.

Приведенные примеры показывают, что состав сплава и технология его промышленного производства существенно влияют не только на абсолютный уровень эксплуатационных свойств, но и на стабильность этих свойств, т. е. на надежность эксплуатации электродов. Последнее оценивают соответствующей статистической обработкой результатов испытаний¹ в пределах одного сплава.

¹ Расчетом дисперсий, средних квадратичных отклонений, характеристиками эмпирического распределения значений стойкости.

Технология изготовления полуфабрикатов из любого дисперсионно твердеющего сплава, в том числе и из наиболее распространенного электродного сплава хромовой бронзы, довольно сложна. Прежде всего это плавка сплава (может осуществляться как в вакуумной, так и в открытых печах), затем литье слитков полунепрерывным или наполнительным методами, горячая (в ряде случаев и холодная) деформация, закалка, холодная деформация и старение.

Для каждого параметра технологии определены пределы, которые обычно оговариваются в заводских стандартах. Эти пределы (каждый в отдельности) в большинстве случаев определяли традиционным экспериментированием, т. е. последовательно один за другим. Абсолютной уверенности в том, что сочетание параметров технологии (найденных таким способом) является оптимальным, нет.

В связи с изложенным была поставлена задача изучить влияние режимов изготовления полуфабрикатов из хромовой бронзы в пределах технологических нормалей на некоторые их свойства [41, 42].

Исследовали твердость (по Бринеллю), а также электропроводность при комнатной температуре и после отжига в течение 1 ч при 500—700°C. Как было показано, такие свойства соответствуют необходимым эксплуатационным свойствам электродов (стойкости при контактной сварке).

Факторы и уровни их варьирования показаны в табл. 10. Температуру нагрева слитков перед горячей прокаткой 900°C, температуру нагрева образцов перед закалкой 1000°C, время выдержки образцов перед закалкой 60 мин, степень холодной деформации между закалкой и старением 50%, температуру старения 450°C принимали для всех опытов одинаковыми.

Поставленную задачу решали с использованием математических методов планирования экспериментов. Если рассматривать все возможные сочетания выбранных шести факторов, каждого на трех уровнях, то пришлось бы выполнить полный факторный эксперимент 3^6 , т. е. 729 опытов. Естественно, что выполнить такой объем экспериментальной работы чрезвычайно затруднительно и вряд ли целесообразно. Вместе с тем есть возможность выполнять эксперимент по плану латинского прямоугольника, причем в качестве плана можно

ТАБЛИЦА 10

ФАКТОРЫ И УРОВНИ ВАРЬИРОВАНИЯ ФАКТОРОВ

Фактор	Интервал варьиро- вания	Уровень		
		нижний	средний	верхний
Содержание хрома в спла- ве, % (X_1)	0,2	0,4	0,6	0,8
Метод плавки и способ ли- тья слитков (X_2)	—	В. П.	О. П. Н.	О. П. П.
Степень деформации, %:				
горячей (X_3)	25	0	25	50
холодной (X_4)	25	0	25	50
Скорость охлаждения при закалке (X_5)	—	В.	Н. В.	В. В.
Продолжительность старе- ния, ч (X_6)	2	2	4	6

Примечание. В. П. — вакуумная плавка, наполнительное литье; О. П. Н. — открытая плавка, наполнительное литье; О. П. П. — открытая плавка, полунепрерывное литье; В — вода; Н. В. — на воздухе; В. В. — в воду, после выдержки 10 с

выбрать ортогональную регулярную реплику от полно-
го факторного эксперимента 3^6 . Такой план включает
всего 27 опытов, т. е. позволяет почти в 30 раз умень-
шить объем экспериментальной работы [41, 42].

Результаты экспериментов показали, что электропро-
водность независимо от параметров обработки сплава
изменяется незначительно (от 50 до 55 м/Ом·мм²) и
все эффекты являются статистически незначимыми.

Твердость зависит от всех изученных факторов при
варьировании их в пределах, указанных в плане, и из-
меняется более значительно, чем электропроводность:
от 105 до 145 кгс/мм² непосредственно после обработки
и от 80 до 111 кгс/мм² после отжига в течение 1 ч
(например, при 600°C). В результате оказывается, что
оптимизация технологии производства полуфабрикатов
из хромовой бронзы может привести к повышению их
твердости примерно на 15—20%, не повлияв на электро-
проводность.

При этом влияние факторов на твердость, измерен-
ную непосредственно после обработки и твердость об-
разцов после отжига, различно. Так как последняя в
большей степени характеризует эксплуатационные свой-
ства электродов, а первая является контрольным свой-
ством в технической документации на полуфабрикаты,

следует обратить особое внимание на это несоответствие. В отношении твердости, измеренной непосредственно после обработки, оптимальными являются содержание хрома 0,6%, вакуумная плавка, наполнительное литье, закалка в холодную воду и отпуск продолжительностью 6 ч. Для повышения твердости после отжига при 600°C необходимо увеличивать содержание хрома до 0,8%, плавку проводить в открытой печи, снизить степень холодной деформации до 25%, перед закалкой сделать паузу в течение 10 с и уменьшить время старения до 2 ч.

Подробный анализ эффектов влияния (в изученных пределах) факторов самих по себе и их взаимодействий позволил сделать следующие выводы:

1. Твердость сплава наиболее сильно зависит от содержания в нем хрома, способа плавки и метода литья. Наибольшая твердость достигается, когда хрома в сплаве содержится максимально (0,8%), а литье осуществляется полунепрерывным методом из открытой печи.

2. Весьма сильным эффектом, влияющим на твердость, является соотношение между содержанием в сплаве хрома и степенью горячей деформации. Сплав с малым содержанием хрома целесообразно деформировать с высокими степенями, а при большом количестве хрома степень деформации может быть существенно уменьшена.

3. Следует отметить также совместное влияние на твердость соотношения между степенью горячей деформации и способом закалки. При большой степени деформации целесообразным является быстрое охлаждение при закалке в воду.

4. На твердость сплава после отжига в течение 1 ч влияет взаимодействие метода плавки, способа литья и продолжительности старения. Направление влияния этого эффекта следующее: после плавки в вакууме и наполнительного литья имеет смысл проводить старение в течение 6 ч, а после плавки в открытой печи и полунепрерывного литья — в течение 2 ч.

5. Твердость сплава после отжига зависит в некоторой степени от соотношения между степенью горячей деформации, способом охлаждения при закалке и продолжительностью старения. Для достижения оптимального значения свойства при большой степени горячей

деформации охлаждение при закалке необходимо осуществлять в воду, а старение проводить в течение 6 ч. Если горячая деформация осуществляется с небольшими обжатиями, то целесообразно закаливать сплав в воду после паузы 10 с, а старение проводить не более 2 ч.

6. Необходимо отметить также еще один эффект, связанный со способом охлаждения при закалке. Взаимодействие между скоростью охлаждения и содержанием в сплаве хрома таково, что при минимальном содержании хрома закаливать в воду имеет смысл после паузы 10 с, а при максимальном желательна быстрая закалка в воду.

Эффекты других взаимодействий в большинстве случаев незначимы и могут иметь случайный характер. Несмотря на то, что планирование и математическая обработка результатов экспериментов дают формальные выводы, следует отметить, что они почти всегда легко объяснимы с точки зрения кинетики старения сплавов, формирования при обработке сплава тонкой структуры и ее термической стабильности, т. е. тех факторов, которые лежат в основе объяснения причин высокой стойкости наиболее эффективных дисперсионно твердеющих сплавов. В результате исследований было установлено, что так называемый «технологический фактор» может повлиять на служебные свойства электродов. В ряде случаев это влияние¹ может быть соизмеримым с усложнением состава сплава, т. е. с созданием нового материала.

ГЛАВА IV

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗРАБОТКИ И ПРИМЕНЕНИЯ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ НОВЫХ ЭЛЕКТРОДНЫХ СПЛАВОВ, ОПТИМИЗАЦИИ РЕЖИМОВ ИХ ОБРАБОТКИ

В настоящее время отечественная промышленность располагает необходимым комплексом электродных сплавов, соответствующих по сочетанию свойств современному мировому уровню. Определены принципиальные технологические схемы изготовления полуфабрика-

¹ Повышение стойкости электродов на 15—20%.

тов и электродов, а также основная теоретическая база, позволившая сформулировать общие принципы легирования сплавов этого типа с учетом требований, предъявляемых к свойствам, характеризующим работоспособность материалов.

Медные сплавы по-прежнему будут оставаться основными электродными сплавами. Однако вряд ли можно ожидать значительного увеличения их номенклатуры или существенного обновления состава. Объясняется это прежде всего тем, что повышение механических свойств, жаропрочности, температуры разупрочнения сплавов связано, как это следует из вышеприведенного, с усложнением их состава. Последнее, как правило, находится в противоречии с требованием снижения стоимости и повышения рентабельности металлургического производства этих сплавов. Таким образом, предстоит решать компромиссную задачу: усложнение составов и расширение номенклатуры сплавов — упрощение состава сплавов и их унификация. Решение такой задачи тем более сложно, что уже имеется освоенный промышленностью набор сплавов, отвечающих высоким требованиям эксплуатации. В подобной ситуации повышение свойств на 10 или 20% может не компенсировать тех отрицательных явлений, которые связаны обычно с освоением нового сложного сплава в металлургическом производстве.

Наиболее рациональный способ решения этой задачи — замена двух-трех сплавов, относящихся к одному классу на один универсальный и наиболее эффективный. Действительно, вряд ли имеется объективная необходимость в одновременном выпуске и, следовательно, применении для одного и того же метода сварки, для одного и того же свариваемого материала электродов, изготовленных из различных сплавов. Исключение допустимо лишь в случае, когда наиболее эффективный, с точки зрения эксплуатационных свойств, сплав одновременно и более трудоемок, например в металлургическом производстве, и выпуск его по этой причине не может обеспечить потребностей сварочного производства в полной мере. В качестве иллюстрации следует привести вполне обоснованное одновременное существование таких двух сплавов, как хромовая и хромоциркониевая бронзы.

Усложнение состава сплава также оправдано и в тех случаях, когда оно одновременно обеспечивает и существенное повышение эксплуатационных свойств, и позволяет упростить общий технологический процесс производства продукции. Примером подобного решения вопроса является сплав БрНХК или, например, сплав системы $\text{Cu}-\text{Cr}-\text{Zr}-\text{Mg}$ (0,4% Cr; 0,15% Zr; 0,05% Mg, ост. Cu) [43, 44]. Оба сплава являются дисперсионно твердеющими, однако в этом случае для достижения максимальных прочностных свойств не требуется обязательной для сплавов такого типа закалки перед старением. Состав сплавов обеспечивает достаточное для последующего распада при старении пересыщение твердого раствора и после сравнительно медленного охлаждения, которое используют, например, после горячей деформации заготовок при прокатке, прессовании, ковке (рис. 34, 35). В этом случае из общей технологической схемы производства полуфабрикатов может быть исключена отдельная операция закалки и, следовательно, не потребуются соответствующих термических печей. Трудоемкость процесса изготовления полуфабрикатов и электродов значительно уменьшится.

Рис. 35 иллюстрирует и еще одно важное преимущество сплава БрНХК перед многими другими дисперсионно твердеющими сплава-

ми — сравнительно широкий интервал обработки на твердый раствор для получения высоких и стабильных свойств после последующего старения. Закалка в воду или охлаждение на воздухе с температур, находящихся в интервале 850—1000°C, вместе с холодной деформацией на 50% и старением при 450—480°C 2 ч обеспечивают практически одинаковые механические свойства.

Другим возможным методом рационального решения задачи повышения эксплуатационных свойств электродных сплавов является усложнение их состава за счет дополнительного введения элемен-

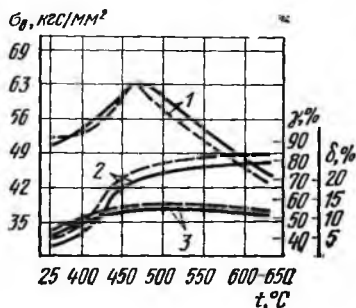


Рис. 34. Влияние температуры старения и скорости охлаждения при закалке на свойства сплава системы Cu — Cr — Zr — Mg:

1 — σ_b ; 2 — $\sigma_{0.2}$ (к меди); 3 — δ ; сплошная линия — охлаждение в воде; пунктирная — охлаждение на воздухе

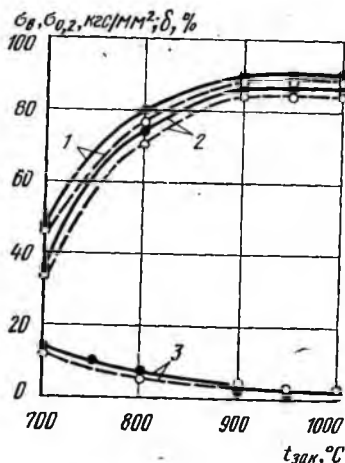


Рис. 35. Влияние температуры и скорости охлаждения при закалке на механические свойства сплава BrHKK (свойства — после старения при 460—480°C, 2 ч):

1 — σ_b ; 2 — $\sigma_{0.2}$; 3 — δ . Сплошная линия — охлаждение в воде; пунктирная — охлаждение на воздухе

тов, относящихся к числу «технологичных» в сочетании с медью. К таким элементам можно отнести Ni, Co, Fe, Mn, Sn и некоторые другие. Введение их в медь не связано с какими-либо дополнительными трудностями при плавке и литье, т. е. расчетный химический состав по этим элементам (шихта) стабильно совпадает с действительным, не происходит зашлакования расплава, не увеличивается количество неметаллических включений в слитках, не ухудшается качество поверхности слитков и т. д. Параметры же остальных операций производства полуфабрикатов из низколегированных медных сплавов, как было показано выше, практически не изменяются от состава, за исключением некоторых уточнений режимов термической обработки. Как было показано, работоспособность электродов контактной сварки во многом определяется температурой начала разупрочнения и темпом разупрочнения материалов, из которых они изготовлены. А это значит, что в некоторых случаях электродный сплав на медной основе можно заменить другим. Температура разупрочнения (рекристаллизация обработки) связана известным соотношением с температурой плавления металла [45]: $T_p = (0,3 \div 0,4) \times T_{пл}$. Поэтому в качестве материала электродов в зарубежной

практике иногда применяют молибден и вольфрам. Основные свойства этих материалов применительно к использованию при сварке, по данным фирмы «Mellory», приведены в табл. 11. Их применение ограничивается сваркой изделий из тонкой ленты и фольги, а также меди и сплавов на основе благородных металлов. Учитывая относительно высокую стоимость молибдена и вольфрама, а также сравнительно узкую область их применения для данного назначения, дальнейшие исследования по основной проблеме электродов вряд ли будут включать тугоплавкие металлы.

Значительно большую перспективу использования в качестве электродов имеют композитные материалы (псевдосплавы), изготовляемые методами порошковой металлургии или пропиткой медью осадка, состоящего из тугоплавкого материала¹. Наибольшее распространение из материалов этого типа нашли вольфрамомедные композиции, известные в отечественной практике и за рубежом как киты или элконайты. Состав и основные свойства некоторых из них приведены в табл. 11.

ТАБЛИЦА 11

СОСТАВ И ОСНОВНЫЕ СВОЙСТВА ЭЛЕКТРОДНЫХ МАТЕРИАЛОВ¹

Материал	Композиция	Твердость, HRB (HRC)	γ, % (к меди)	σ _в , кгс/мм ²
Элконайт 20	75% W, Cu	97—100B	27—31	65
Элконайт 30	78% W, Cu	99—101B	27—30	68
Элконайт 100	Mo	85—95B	30	54
Mo				
Элконайт 100W	W	50C	30	34

¹ Температура разупрочнения всех материалов приблизительно 1000°C.

Обычно композитные материалы применяют в виде различного типа наконечников и вставок, формирующих рабочую часть электрода. Применение составных электродов — один из самых перспективных способов повысить эффективность контактной сварки в результате снижения относительной стоимости электродов. В данном случае материалы с высокой температурой разупрочнения могут оказаться весьма перспективными, так как позволяют с успехом использовать для соединения частей электродов диффузионную сварку в вакууме или высокотемпературную пайку твердыми припоями на серебряной, медносеребряной основе, на основе латуней и т. д. Температуры диффузионной сварки или пайки, как правило, находятся в пределах 800—1000°C, т. е. далеко за интервалом разупрочнения традиционных медных сплавов.

Несмотря на то что, например, вольфрамомедные порошковые композиции как электродный материал известны уже давно, до сих пор они не нашли достаточно широкого распространения. Причины заключаются в следующем.

Во-первых, начальные опыты по использованию композитных

¹ Системы проволок, волокон, сеток, пористых порошковых конструкций и т. д.

материалов в качестве электродов показали во многих случаях [2, 3] отрицательные результаты, главным образом больше из-за низкого качества заготовок. Во-вторых, практически отсутствует достаточно налаженное в больших масштабах производство композитных материалов для электродов, а в ряде случаев оно вообще не вышло за пределы лабораторий. В-третьих, недостаточно проработана теория подобных материалов и в первую очередь такие вопросы, как оптимальное соотношение компонентов в композиции, взаимодействие основы и наполнителя, диффузионные явления в материале и их роль в процессе упрочнение — разупрочнение, оптимальные размеры, форма и распределение тугоплавкой составляющей материала и т. д. В-четвертых, нет окончательной ясности относительно определения оптимальной области или областей сварки, где их применение дает наибольший эффект. Например, попытка использования вольфрамомедных композитов в качестве электродов точечной сварки на режимах с большим удельным давлением и сварочным током приводит к резкому возрастанию контактного сопротивления и температуры на границе электрод — свариваемая деталь и затем к привариванию электрода вследствие эрозии мягкой и сравнительно легкоплавкой составляющей материала (меди). В то же время это свойство вольфрамомедных материалов можно использовать и как положительное, если применять его в таком процессе, как контактная клепка. В последнем случае высокая температура на головке стержня (в месте контакта с электродом), а также высокая твердость и жаропрочность электрода являются условием успешного проведения процесса.

Недостатки, которые имеют композитные материалы описанного выше типа, могут быть в принципе устранены в так называемых внутреннеокисленных сплавах, которые тоже относятся к числу дисперсно упрочненных материалов. Упрочнителями в этих материалах являются мелкодисперсные окислы менее благородных, чем основа

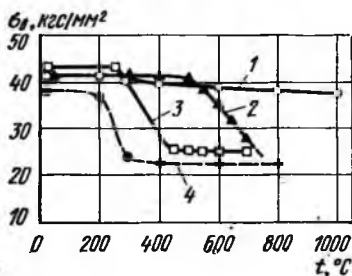


Рис. 36. Влияние температуры отжига в течение 1 ч на предел прочности меди и сплавов на основе меди:

1 — медный внутреннеокисленный сплав; 2 — Cu+0,3% Zr; 3 — Cu+0,1% Ag; 4 — медь

(медь), элементов. При внутреннем окислении происходит образование дисперсных частиц окислов. При этом матрица обедняется легирующим элементом и приобретает проводимость, близкую к проводимости чистой меди. Холодная деформация, которая является обязательной составной частью технологического процесса производства полуфабрикатов из такого материала, сообщает ему дополнительную необходимую прочность. Нагрев до температур, близких к температуре плавления основы, практически не приводит к разупрочнению внутреннеокисленного материала (рис. 36) [46]. Производство

крупногабаритных цельнометаллических электродов контактной сварки (шовной, рельефной) из внутреннеокисленного материала может быть экономически нецелесообразным, однако изготовление вставок, малогабаритных электродов точечной сварки, в первую очередь неохлаждаемых, вполне реально. Ближайшая задача в этом плане будет заключаться в отработке наиболее экономичной промышленной технологии производства различных полуфабрикатов и широком опробовании их при различных методах и режимах сварки.

Таким образом, можно считать, что в настоящее время определены основные направления и способы дальнейшего совершенствования составов электродных материалов. Очевидна и необходимость постоянных систематических исследований в этом направлении.

Однако решение задачи увеличения стойкости электродов и, следовательно, повышения эффективности контактной сварки путем совершенствования или разработки состава электродного материала не всегда является рациональным. Значительные резервы повышения долговечности электродов заключены в оптимизации режимов термической и термомеханической обработки полуфабрикатов, например из дисперсионно твердеющих сплавов, а также уже готовых электродов.

Как было показано выше, разупрочнение электродного сплава, и, как следствие этого, изменение размера контактной поверхности электрода происходят в основном в результате двух взаимосвязанных и непрерывно протекающих процессов: рекристаллизации и коагуляции выделений фазы или фаз-упрочнителей, приводящей к увеличению расстояния между ними и, следовательно, облегчающей движение дислокаций. В результате коагуляции выделений ослабевает также их барьерное действие на рекристаллизацию. Таким образом, для повышения стойкости электродов необходимо добиваться наиболее благоприятной микро- и субмикроструктуры сплава. Кроме того, размер выделений должен быть по возможности наиболее стабильным в процессе всей работы электрода. Учитывая все это, авторами совместно с Ф. С. Новиком была сделана попытка оптимизировать режим ТМО сплавов BrX и BrXCr применительно к одному из конкретных примеров точечной сварки. Работа носила характер эксперимента и показала, что в результате определенного сочетания закалки, деформации при температуре, близкой к температуре старения сплавов, старения и холодной или теплой деформации можно получить почти двукратное увеличение стойкости электродов. Эффект, видимо, можно объяснить протеканием при теплой деформации сразу двух процессов: формированием оптимальной структуры деформации, характеризующейся определенной плотностью дислокаций, и распадом пересыщенного твердого раствора. Вероятно, это сочетание привело к возникновению большого числа центров зарождения выделений второй фазы, а в результате последующего старения и деформации образовалась структура с оптимальным числом и размером частиц в единице объема. Это лишь один из примеров решения конкретной задачи в результате оптимизации режимов обработки электродных сплавов.

ГЛАВА V

ЭКОНОМИЧЕСКАЯ ЭФФЕКТИВНОСТЬ В РЕЗУЛЬТАТЕ ОПТИМИЗАЦИИ И УНИФИКАЦИИ СОСТАВОВ ЭЛЕКТРОДНЫХ СПЛАВОВ И МЕТОДОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОДОВ

Радикальное решение проблемы электродов контактной сварки определяет весьма значительный экономический эффект в народном хозяйстве. Он складывается в основном из следующих составных частей: 1) снижение металлоемкости конструкций; 2) экономия цветных металлов за счет применения рациональных методов изготовления электродов; 3) снижение трудозатрат при изготовлении электродов в случае их централизованного производства; 4) экономия за счет повышения эксплуатационной стойкости электродов вследствие оптимизации составов электродных сплавов и методов их обработки в зависимости от свариваемых материалов, условий и параметров сварки.

Действительно, одной из актуальных задач машиностроения, электротехники и некоторых других отраслей промышленности является снижение металлоемкости конструкций. В этом плане, например, замена литых деталей на сварные из проката является одним из кардинальных способов экономии металла. В производстве изделий машиностроения доля чугунного и стального литья составляет у нас в стране около 40% и ежегодно на снятие стружки с литых и других чрезмерно тяжелых деталей затрачивается более миллиарда рублей¹. Расчеты показали, что замена только в металлургическом машиностроении лишь 20000 т стальных отливок сварными заготовками из проката позволит уменьшить массу выпускаемого оборудования примерно на 4000 т, относительный расход жидкой стали уменьшить на 32000 т в год, а затраты труда сократить более чем на полтора миллиона часов. Кроме того, расширение использования сварного проката в машиностроении создает возможность учета более высокой его прочности в конструкциях по сравнению с литьем, возможность использования современных высокопрочных сплавов, а также создает чисто конструкторские резервы при проектировании наиболее эффективного оборудования.

Вместе с тем наряду с решением организационных задач проблема снижения материалоемкости конструкций потребует решения и многих технических задач относительно электродных материалов и электродов контактной сварки. Это прежде всего решение комплекса состав оптимального сплава — режим оптимальной термической или термомеханической обработки применительно к вероятному применению новых марок свариваемых сплавов и большей, чем в настоящее время принято толщины, многослойных материалов, материалов с коррозионностойкими и декоративными покрытиями и т. д.

Рассмотренная составная часть общей экономической эффектив-

* Парфенов В. По всей цепи. Курс — эффективность. «Правда», № 332 (21301) от 27 ноября 1976 г.

ности относилась к сварке вообще как технологическому процессу рационального производства изделий. Последующие расчеты более определены и конкретны, так как связаны непосредственно с производством электродов для контактной сварки.

Л. К. Ершовым и И. В. Демченковым [3] было показано, что наиболее прогрессивным и эффективным методом производства электродов является холодная штамповка.

Рис. 37. Схема изготовления электрода точением из прутка (заштрихована часть прутка, удаляемая в виде стружки при точении)

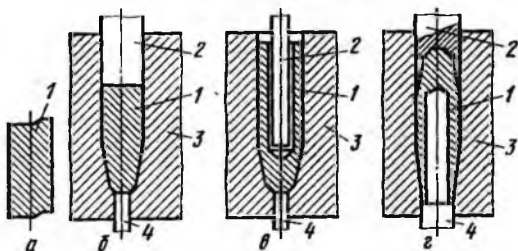
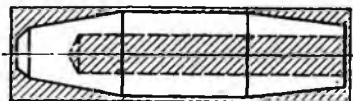


Рис. 38. Схема изготовления электрода методом штамповки:

а — заготовка для штамповки; б — калибровка заготовки и формовка рабочей части электрода; в — изготовление канала охлаждения; г — формовка посадочного конуса; 1 — штампуемый материал; 2 — пуансон; 3 — матрица; 4 — толкатель

Однако в настоящее время штамповка электродов составляет не более 5% их общего производства в стране. Таким образом, основным способом производства электродов контактной сварки в настоящее время является точение¹. При этом в стружку переходит до 30—40% дорогостоящих медных сплавов (рис. 37), а производительность труда и качество электродов во многом зависят от субъективных условий и даже при применении современных токарно-револьверных станков-автоматов недостаточно высокие. Соответственно и стоимость электродов на разных заводах различная и в среднем почти в два раза выше стоимости штампованных электродов. Вместе с тем технологический процесс изготовления прямых электродов методом штамповки достаточно прост и состоит из следующих основных операций (рис. 38): 1) рубки прутка на мерные заготовки; 2) закалки заготовок (в случае изготовления электродов из дисперсионно твердеющих сплавов); 3) калибровки заготовки (формирования плоско-параллельных торцовых поверхностей заготовки); калибровку заготовки можно совмещать с формовкой рабочей части электрода; 4) штамповки электрода (формирования канала охлаждения) методом обратного выдавливания; 5) формирования посадочного ко-

¹ Производства электродов методом литья практически нет.

нуса; 6) старения (в случае изготовления электродов из дисперсионно-твердеющих сплавов); 7) токарной доводки рабочей и посадочной частей электродов (в случае необходимости).

Такая технология изготовления электродов позволяет экономить до 44% медных сплавов и повышает производительность труда в четыре-пять раз по сравнению с технологией их изготовления на токарных станках [3]. Расчеты показывают, что минимальная экономия при изготовлении 1 кг электродов методом штамповки составляет 2 р. 29 к. Этот эффект можно получить только за счет метода изготовления электродов (сравниваются одни и те же марки электродного материала) без учета эффекта, связанного с оптимизацией составов сплавов применительно к конкретным условиям сварки.

Однако организация производства электродов методом штамповки на каждом предприятии вряд ли целесообразна, даже если учитывать данные фирмы «Herlan» (ФРГ), показывающие, что максимальное количество изделий, получаемых методом холодного выдавливания из меди и медных сплавов, при котором это производство считается экономически выгодным¹, составляет всего 5000 штук в год. Только тогда можно говорить об оптимальных параметрах технологии, соблюдении технологической дисциплины, внедрении новых режимов термической обработки, проведении соответствующих исследований и испытаний продукции, гарантирующих их высокое качество, рациональном использовании оборудования, высокой производительности труда и других положительных аспектах любого крупномасштабного производства.

При организации производства электродов с использованием метода штамповки необходимо учитывать, что общая схема изготовления электродов (изготовление термически обработанных прутков—изготовление электродов) несколько изменится. Операции термической обработки и холодной деформации в общей схеме переносятся на завод—изготовитель электродов. Такое перемещение также имеет ряд преимуществ, прежде всего относящихся к рациональному выбору и использованию оборудования. Холодная деформация, необходимая в большинстве случаев для ускорения процесса старения и получения требуемого уровня механических свойств, осуществляется в данном случае за один-два приема при штамповке², которая является одновременно и операцией придания электроду необходимой формы. Термическая обработка (закалка и старение) электродных заготовок и электродов по температурным и временным параметрам ничем не отличается от подобной обработки прутков. Однако проведение этих операций на короткомерных заготовках требует минимальных затрат на проектирование (подбор) и изготовление современных термических печей³.

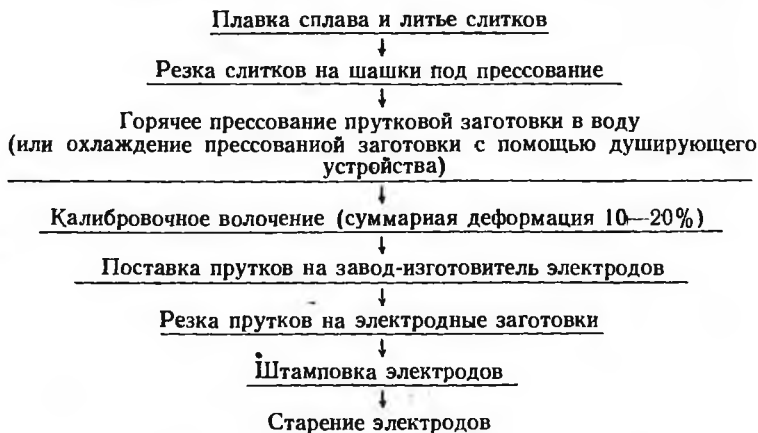
Процесс производства электродов (от плавки сплава до изготовления собственно электрода) может быть таким, как описан выше, и может быть другим в зависимости от типа сплава или электрода (назначение, размер, форма и т. д.). Например, целесообразна схема с использованием в качестве составной части производства электродов закалки, совмещенной с горячим прессованием прутков

¹ Учтено приобретение или замена соответствующего оборудования.

² В отличие от 8—15 проходов, например при волочении заготовки.

³ С защитной атмосферой, необходимой механизацией и автоматизацией процесса.

на металлургическом заводе [27]. В этом случае общая схема выглядит следующим образом:



При использовании этой схемы возможно в случае технической необходимости изменять очередность операций старения и деформации непосредственно в процессе изготовления электродов или сочетать старение с деформацией при повышенных температурах.

Наиболее заметный вклад в этот эффект вносит выполнение рекомендаций относительно применения в каждом конкретном случае оптимальных составов сплавов. Под оптимальным составом сплава следует понимать не только наилучшую стойкость электродов, изготовленных из этого сплава, но и его технологичность в металлургическом производстве¹, общую стоимость сплава и дефицитность легирующих компонентов, сочетание основных свойств, которые характеризуют универсальность его применения, технологичность при производстве электродов, распространенность сплава в промышленности и освоенность его производства (готовность металлургической промышленности к серийному производству). Точно оценить весь этот комплекс показателей вряд ли представляется возможным, тем более что некоторые из показателей являются качественными, другие зависят от конкретных условий изготовления и использования сплавов и, следовательно, могут быть относительно субъективны.

Однако все же представляется возможным показать один из примеров условной оценки сравнительной эффективности применения ряда освоенных отечественной промышленностью электродных сплавов, в данном случае при использовании их при контактной точечной

¹ Выход годного, производительность и трудоемкость процессов производства полуфабрикатов, сложность технологии плавки, литья и обработки, возможность использования отходов при выплавке сплава, стабильность контролируемых свойств и воспроизводства химического состава с минимальными допусками легирующих компонентов, сложность применяемого плавильного и другого оборудования и т. д.

сварке нержавеющей стали ($\mathcal{E}_{\text{н.с}}$) и малоуглеродистой стали ($\mathcal{E}_{\text{у.с}}$). В соответствии с приведенными выше рассуждениями, условный показатель сравнительной эффективности ($\mathcal{E}$) в общем случае определяется следующим выражением: $\mathcal{E} = K_{\text{н}} \cdot K_{\text{р}}$, где $K_{\text{н}}$ — постоянный коэффициент, характеризующий основные свойства сплава, определяющие его применение для данного назначения, его стоимость и трудоемкость изготовления; $K_{\text{р}}$ — коэффициент, учитывающий работоспособность материала.

В свою очередь коэффициент $K_{\text{н}}$ зависит от следующих величин:

$$K_{\text{н}} = \gamma \sigma_{0,2} t_{0,5 \sigma} / (C T).$$

где γ — электропроводность сплава, $\text{м}/(\text{Ом} \cdot \text{мм}^2)$; вместо этого свойства могут быть даны удельное электросопротивление или теплопроводность сплава; $\sigma_{0,2}$ — условный предел текучести сплава при 600°C , $\text{кгс}/\text{мм}^2$, характеризующий его жаропрочность; $t_{0,5 \sigma}$ — температура, $^\circ\text{C}$, после отжига в течение 1 ч, при которой прочностные свойства сплава уменьшились на 50% по сравнению с исходным и полностью разупрочненным состоянием; этот показатель характеризует интенсивность разупрочнения сплава; C — коэффициент, характеризующий среднюю стоимость 1 т прутков сплава, приведенную к стоимости меди; T — коэффициент, оценивающий трудоемкость изготовления полуфабрикатов и электродов; в зависимости от типа сплавов этот коэффициент условно принимают равным от 1 до 2,5.

Свойства сплавов, приведенные в формуле расчета коэффициента $K_{\text{н}}$, как это следовало из изложенного выше, в наибольшей степени коррелируют с эксплуатационными свойствами электродов, изготовленных из этих сплавов.

Значение коэффициента $K_{\text{р}}$ зависит от значения стойкости электрода при контактной сварке и может выражаться числом сварок (точечная сварка) или длиной сварного шва (роликовая сварка) до первой зачистки, переточки или до полного износа электрода (N), а также от некоторого числа (P), характеризующего относительный расход электродов при выполнении какой-то определенной работы.

Таким образом, коэффициент $K_{\text{р}}$ определяется следующим выражением:

$$K_{\text{р}} = N \cdot P.$$

Для точечной сварки малоуглеродистой и нержавеющей сталей¹ стойкость электродов оценивали по изменению диаметра рабочей части электрода (Δd) после 10000 сварок (чем больше Δd , тем меньше стойкость). Следовательно, сравнительная эффективность электродных сплавов в данном случае определяется выражением

$$\mathcal{E} = \lambda \sigma_{0,2} t_{0,5 \sigma} / (C T \Delta d P).$$

Данные для расчета коэффициентов эффективности и коэффициенты эффективности ряда электродных сплавов приведены в табл. 12.

¹ Темп сварки соответственно 200 и 60 точек в 1 мин; сварочный ток 9000 и 7200 А; усилие на электродах 300 и 430 кгс; продолжительность сварочного импульса 0,12 и 0,18 с; толщина свариваемых листов 0,8–0,8 мм.

ТАБЛИЦА 12

**ДАННЫЕ ДЛЯ РАСЧЕТА И КОЭФФИЦИЕНТЫ СРАВНИТЕЛЬНОЙ
ЭФФЕКТИВНОСТИ ЭЛЕКТРОДНЫХ СПЛАВОВ**

Сплав	C	T	$\gamma, \frac{M}{(OM \cdot MM^2)}$	$t_{0,5 \sigma}, ^\circ C$	$\sigma_{0,2}, \frac{KGS}{MM^2}$	K_{Π}
Си	1000	1	58	200	2	23
БрСр	1200	1	54	325	4	59
БрКд	1300	1	44	325	6	66
БрХ	1300	1,5	49	550	17	235
БрХЦр	2500	1,5	49	600	24	188
БрХЦр-А	2600	1,5	50	575	20	147
БрХВЦр	2900	1,5	49	575	21	136
БрКХКо	3200	2,5	30	625	26	61
БрКБ	3900	2,5	29	600	20	36
БрНБТ	2900	2,5	25	600	24	50
БрНХК	2400	2,5	27	575	26	67

Продолжение табл. 12

Сплав	$\Delta d_{н.ст}^*, \text{мм}$	$P_{н.с}$	$\Delta d_{у.ст}^*, \text{мм}$	$P_{у.с}$	$\mathfrak{E}_{н.с}$	$\mathfrak{E}_{у.с}$
Си	7,7	45	3,2	4,1	0,1	2
БрСр	5,1	30	2,88	3,7	0,4	6
БрКд	4,3	25	2,74	3,5	0,6	7
БрХ	1,9	11*	1,45	1,9	11	85
БрХЦр	0,98	5,8	0,78	1,0	33	241
БрХЦр-А	1,2	7,1	1,51	1,9	17	51
БрХВЦр	0,45	2,6	0,98	1,3	116	107
БрКХКо	0,17	1,0	1,62	2,1	359	18
БрКБ	0,64	3,8	1,38	1,8	15	15
БрНБТ	0,63	3,7	0,80*	1,0	22	63
БрНХК	0,57	3,3	0,83	1,1	36	73

Примечание. Коэффициент C получен на основании прейскуранта № 02—06 «Оптовые цены на прокатно-тянутые и прессованные изделия из цветных металлов и сплавов». М., Прейскурантиздат, 1974.

* Трещины на поверхности электродов.

Расчеты показали преимущество дисперсионно твердеющих сплавов перед упрочняемыми деформацией при применении их для сварки сталей. Этот вывод тем более важен, что сравнительно низкая стоимость и трудоемкость изготовления меди и сплавов, упрочненных деформацией, явились одной из причин все еще широкого применения меди и, например, сплава системы Си—Сд при контактной сварке. Подобное не распространяется на сварку легких сплавов, где такой показатель работоспособности электродов, как перенос меди на свариваемую деталь, в ряде случаев важнее показателя, характеризующего их стойкость (отсутствие деформации рабочего конца электрода). В последнем случае при расчете эффективности при-

менения сплавов коэффициент K_p должен оценивать, естественно, иные показатели работоспособности электрода.

Другими словами, ориентируясь на приведенную методику расчета эффективности, в каждом конкретном случае можно ориентировочно оценить целесообразность или необходимость применения того или иного материала.

В целом решение задачи по изготовлению и применению сплавов оптимальных составов для различных типов контактной сварки и производства конкретных сварных конструкций позволит, с одной стороны, унифицировать рекомендуемые для промышленного применения электродные сплавы, а с другой — получить значительный экономический эффект в народном хозяйстве. Этот эффект в расчете на общий выпуск 1000 т электродов будет равен более 7,5 млн. руб. (при оптимизации составов сплавов для сварки различных материалов ориентировочно в пропорции: 70—75% углеродистой стали; 15—20% нержавеющей стали; 15—20% сплавов на никелевой основе и 10% легких сплавов).

ПРИЛОЖЕНИЕ

ФИЗИЧЕСКИЕ И МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОСНОВНЫХ ЭЛЕКТРОДНЫХ СПЛАВОВ

Свойство	Определяемое значение при температуре, °С					
	20	300	400	500	600	700

1. СЕРЕБРЯНАЯ БРОНЗА БрСр

S_k , кгс/мм ²	80	64	38	34	28	25
σ_b , кгс/мм ²	44	31	13	10	6	4
$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	42	30	8	7	4	3
δ_5 , %	14	9	53	50	48	76
ψ , %	40	37	72	75	91	98
a_R , кгс·м/см ²	17	18	17	11	10	8
HV , кгс/мм ²	115	90	72	22	14	9
HV_T (60 мин), кгс/мм ²	—	—	57	13	7	5
E , кгс/мм ²	12700	11900	11000	10100	9300	8200
$\alpha \cdot 10^{-6}$ /град	—	17,5	17,9	18,3	18,7	19,0
ρ , мкОм·см	1,85	3,77	4,46	5,24	6,05	6,88
γ , м/(Ом·мм ²)	54	27	22	19	16	15
γ , % (к меди)	93	96	95	97	97	96
λ , Вт/(м·град)	382	377	376	369	361	358

2. КАДМИЕВАЯ БРОНЗА БрКд

S_k , кгс/мм ²	110	76	75	70	53	25
σ_b , кгс/мм ²	42	31	22	14	8	5
$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	40	28	19	11	6	4
δ_5 , %	17	17	30	64	86	66
ψ , %	81	74	82	95	95	83
a_R , кгс·м/см ²	16	17	17	15	13	8
HV , кгс/мм ²	125	100	95	31	18	11
HV_T (60 мин), кгс/мм ²	—	—	57	17	9	6
E , кгс/мм ²	12400	11300	10800	9800	9000	8100
$\alpha \cdot 10^{-6}$ /град	—	17,6	18,0	18,0	18,9	19,2
ρ , мкОм·см	2,28	4,17	4,87	5,60	6,36	7,18
γ , м/(Ом·мм ²)	44	24	21	18	16	14
γ , % (к меди)	76	86	87	90	91	93
λ , Вт/(м·град)	326	348	345	343	340	335

3. ХРОМОВАЯ БРОНЗА БрХ

S_k , кгс/мм ²	87	61	37	33	28	22
σ_b , кгс/мм ²	45	37	33	28	18	9
$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	42	35	32	27	17	8
δ_5 , %	19	15	7	7	11	25
ψ , %	67	40	27	20	32	67
a_R , кгс·м/см ²	22	21	20	14	15	11
HV , кгс/мм ²	135	108	95	61	42	29
HV_T (60 мин), кгс/мм ²	—	—	69	35	22	12
E , кгс/мм ²	13100	12100	11500	10900	9800	9100
$\alpha \cdot 10^{-6}$ /град	—	17,3	17,7	18,2	18,5	18,9
ρ , мкОм·см	2,03	3,68	4,48	5,27	6,07	6,86
γ , м/(Ом·мм ²)	49	27	22	19	16	14
γ , % (к меди)	85	96	95	95	94	94
λ , Вт/(м·град)	367	386	375	365	358	351

Свойство	Определяемое значение при температуре, °С					
	20	300	400	500	600	700

4. ХРОМОЦИРКОНИЕВАЯ БРОНЗА БрХЦр

S_k , кгс/мм ²	126	79	72	58	50	29
σ_B , кгс/мм ²	50	39	35	30	25	10
$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	45	37	34	29	24	9
δ_5 , %	24	20	18	18	18	29
ψ , %	84	81	82	82	81	95
a_H , кгс·м/см ²	24	21	21	18	16	12
HV , кгс/мм ²	148	122	106	80	70	38
HV_T (60 мин), кгс/мм ²	—	—	86	60	33	19
E , кгс/мм ²	13000	11800	10900	10000	9300	8800
$\alpha \cdot 10^{-6}$ /град	—	17,5	17,9	18,3	18,6	19,0
ρ , мкОм·см	2,04	3,80	4,41	5,24	6,02	6,86
γ , м/(Ом·мм ²)	49	26	23	19	16	14
γ , % (к меди)	85	93	96	95	94	94
λ , Вт/(м·град)	366	380	382	367	361	350

5. ХРОМОВАНАДИЙЦИРКОНИЕВАЯ БРОНЗА БрХВЦр

S_k , кгс/мм ²	113	71	62	53	35	33
σ_B , кгс/мм ²	55	45	41	35	22	12
$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	51	43	40	34	21	11
δ_5 , %	19	14	12	12	16	30
ψ , %	58	55	57	58	68	89
a_H , кгс·м/см ²	18	17	17	16	16	15
HV , кгс/мм ²	160	120	110	102	79	33
HV_T (60 мин), кгс/мм ²	—	—	88	71	35	15
E , кгс/мм ²	13200	11700	10800	9800	9100	8600
$\alpha \cdot 10^{-6}$ /град	—	17,5	17,9	18,4	18,7	19,1
a , г/см ³	8,90	8,77	8,73	8,70	8,65	8,58
ρ , мкОм·см	2,05	3,78	4,49	5,25	6,08	6,95
γ , % (к меди)	84	93	94	95	96	96
c_p , ккал/(кг·град)	0,094	0,100	0,102	0,105	0,105	0,106
λ , Вт/(м·град)	364	382	374	366	357	347

6. КОБАЛЬТБЕРИЛЛИЕВАЯ БРОНЗА БрКБ

S_k , кгс/мм ²	116	85	73	47	33	26
σ_B , кгс/мм ²	78	63	55	42	23	11
$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	76	62	54	41	20	6
δ_5 , %	13	9	6	9	19	26
ψ , %	22	13	11	21	76	90
a_H , кгс·м/см ²	3	4	4	4	6	9
HV , кгс/мм ²	230	200	185	105	66	33
HV_T (60 мин), кгс/мм ²	—	—	120	75	30	14
E , кгс/мм ²	13000	11900	11400	10800	9400	8600
$\alpha \cdot 10^{-6}$ /град	—	17,8	18,2	18,5	18,9	19,2
ρ , мкОм·см	3,46	5,36	6,14	7,05	8,25	9,75
γ , м/(Ом·мм ²)	29	19	16	14	12	10
γ , % (к меди)	50	68	67	70	70	63
λ , Вт/(м·град)	209	265	272	273	263	251

Свойство	Определяемое значение при температуре, °С					
	20	300	400	500	600	700

7. НИКЕЛЬБЕРИЛЛИЕВАЯ БРОНЗА БрНБТ

S_k , кгс/мм ²	90	72	62	48	28	17
σ_B , кгс/мм ²	82	67	60	48	25	12
$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	81	66	60	48	24	11
δ_5 , %	5	5	3	1	5	6
ψ , %	7	6	5	3	7	9
a_H , кгс·м/см ²	3	3	2	1	2	5
HV , кгс/мм ²	240	—	190	125	80	43
HV_T (60 мин), кгс/мм ²	—	—	130	95	50	18
E , кгс/мм ²	14000	13100	12300	11000	10200	9500
$\alpha \cdot 10^{-6}$ /град	—	18,0	18,2	18,5	18,9	19,2
ρ , мкОм·см	3,97	6,07	6,52	7,65	8,72	10,58
γ , м/(Ом·мм ²)	25	16	15	13	11	9
γ , % (к меди)	43	57	63	65	65	56
λ , Вт/(м·град)	186	234	253	249	248	240

8. КОБАЛЬТКРЕМНИЕВАЯ БРОНЗА БрКХКс

S_k , кгс/мм ²	121	60	50	39	33	27
σ_B , кгс/мм ²	70	47	45	35	28	17
$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	66	44	44	34	26	15
δ_5 , %	18	11	9	6	14	22
ψ , %	60	24	11	10	25	51
a_H , кгс·м/см ²	17	13	12	11	13	14
HV , кгс/мм ²	180	165	146	112	68	45
HV_T (60 мин), кгс/мм ²	—	—	115	69	40	27
E , кгс/мм ²	13800	12600	12100	11500	10600	9500
$\alpha \cdot 10^{-6}$ /град	—	17,8	18,0	18,4	18,8	19,2
ρ , мкОм·см	3,35	5,30	6,10	6,90	8,22	9,94
γ , м/(Ом·мм ²)	30	19	16	15	12	10
γ , % (к меди)	52	68	67	75	70	63
λ , Вт/(м·град)	215	268	274	279	264	245

9. НИКЕЛЬКРЕМНИЕВАЯ БРОНЗА БрНХК

S_k , кгс/мм ²	136	101	82	52	36	32
σ_B , кгс/мм ²	80	65	58	47	27	13
$\sigma_{0,2}$, кгс/мм ²	78	63	57	46	26	11
δ_5 , %	17	13	11	7	13	35
ψ , %	52	45	34	14	33	81
a_H , кгс·м/см ²	9	9	9	8	12	14
HV , кгс/мм ²	240	200	180	120	87	50
HV_T (60 мин), кгс/мм ²	—	—	125	95	54	21
E , кгс/мм ²	14500	13000	12400	11100	9800	9300
$\alpha \cdot 10^{-6}$ /град	—	17,9	18,1	18,4	18,7	19,0
ρ , мкОм·см	3,72	5,46	6,18	7,22	8,64	10,88
γ , м/(Ом·мм ²)	27	18	16	14	12	9
γ , % (к меди)	46	68	69	70	68	60
λ , Вт/(м·град)	196	262	271	268	252	245

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Чулошников П. Л. Точечная и роликовая электросварка легированных сталей и сплавов. М., «Машиностроение», 1974. 232 с. с ил.
2. Слиозберг С. К., Чулошников П. Л. Электроды для контактной сварки. Л., «Машиностроение», 1972. 96 с. с ил.
3. Кутковский С. И. Электроды контактных электросварных машин. Л., «Машиностроение», 1964. 112 с. с ил.
4. Николаев А. К., Новик Ф. С., Розенберг В. М., Слиозберг С. К. — «Цветные металлы», 1974, № 11, с. 53—59.
5. Захаров М. В., Захаров А. М. Жаропрочные сплавы. М., «Металлургия», 1972. 384 с. с ил.
6. Малевский Ю. Б., Грабин В. Ф., Васильев В. Г. и др. — «Автоматическая сварка», 1964, № 8, с. 47—57.
7. Смирягин А. П., Смирягина Н. А., Белова А. В. Промышленные цветные металлы и сплавы. М., «Металлургия», 1974. 488 с. с ил.
8. Николаев А. К., Пружинин И. Ф., Розенберг В. М. — «Цветные металлы», 1976, № 2, с. 75—77.
9. Николаев А. К., Пружинин И. Ф., Розенберг В. М. — «Металловедение меди и медных сплавов». М., «Металлургия», 1975 («Гипроцветметобработка». Вып. 48), с. 25—31.
10. Горелик С. С. Рекристаллизация металлов и сплавов. М., «Металлургия», 1978. 570 с. с ил.
11. Хансен М., Андерко К. Структуры двойных систем. Т. I, II. М., Metallurgizdat, 1962. 1488 с. с ил.
12. Кампакаты А., Сузук Х., Кинан Н. — «J. Japan Inst. Metals», 1967, v. 31, № 11, p. 1253—1257.
13. Мальцев М. В. Металлография промышленных цветных металлов и сплавов. М., «Металлургия», 1970. 364 с. с ил.
14. Розенберг В. М., Николаев А. К. — «Цветные металлы», 1972, № 8, с. 65—70.
15. Николаев А. К. — «Цветные металлы», 1974, № 1, с. 61—64.
16. Ревича Н. И., Николаев А. К., Розенберг В. М. — «Изв. АН СССР. Металлы», 1975, № 1, с. 215—218.
17. Закс Г. Практическое металловедение. М.—Л., ОНТИ, 1937. 222 с. с ил.
18. Новиков И. И., Захаров М. В. Термическая обработка металлов и сплавов. М., Metallurgizdat, 1962. 429 с. с ил.
19. Захаров М. В., Степанова М. В., Глазов В. М. — Митом, 1956, № 3, с. 23—25.
20. Захаров М. В., Степанова М. В., Глазов В. М. — Митом, 1957, № 3, с. 23—27.
21. Hall M. G., Aaranson H. I., Kinsmark R. — «Surface Science», 1972, v. 31, № 6, p. 257—274.
22. Розенберг В. М., Николаев А. К. — «Совершенствование технологии производства полуфабрикатов из цветных металлов и сплавов». М., «Металлургия», 1977 («Гипроцветметобработка». Вып. 50), с. 50—67.
23. Köster W., Knorr W. — «Z. Metallkunde», 1954, Bd 45, № 6, S. 350—359.
24. Новиков И. И. Теория термической обработки металлов. М., «Металлургия», 1974. 400 с. с ил.
25. Ревича Н. И., Новиков А. И., Николаев А. К., Розенберг В. М. — Изв. вуз. «Цветная металлургия», 1973, № 6, с. 106—110.

26. Новиков А. И., Розенберг В. М. — ФММ, 1974, т. 37, № 1, с. 201—203.
27. Белоусов Н. П., Гинсбург М. Г., Зуева О. М. и др. — «Термообработка цветных металлов и сплавов». М., «Металлургия», 1973 («Гипроцветметобработка». Вып. 40), с. 61—64.
28. Теплицкий М. Д., Николаев А. К., Ревина Н. И., Розенберг В. М. — ФММ, 1975, т. 40, № 6, с. 1240—1243.
29. Фридлянский Р. М., Стрельцов Ф. Н., Молдавский О. Д. Вакуумная плавка меди и ее сплавов. М., «Цветметинформация», 1974. 88 с. с ил.
30. Losman J. — «Metallurgie», 1973, v. XIII, № 3, p. 112—116.
31. Баженов М. Ф., Страхов Г. Н. — «Цветные металлы», 1976, № 4, с. 6—10.
32. Курдюмов А. В., Метрик А. А. — «Научные доклады высшей школы». 1958, № 1, с. 62—65.
33. Курдюмов А. В., Ротерштейн А. А. — «Изв. вуз. Цветная металлургия», 1960, № 5, с. 132—136.
34. Николаев А. К. — «Бюл. ин-та Цветметинформация», 1969, № 13, с. 43—44.
35. Лайнер А. И., Берент Я. К., Коленкова М. А., Борисов Г. Б. — «Цветные металлы», 1965, № 3, с. 87—90.
36. Головешко В. Ф., Соколов В. И. — Плавка и литье цветных металлов и сплавов. М., «Металлургия», 1969 («Гипроцветметобработка». Вып. 32), с. 105—112.
37. Куликов И. С. Раскисление металлов. М., «Металлургия», 1975. 504 с. с ил.
38. Николаев А. К., Ревина Н. И. — «Плавка и литье цветных металлов и сплавов». М., «Металлургия», 1969 («Гипроцветметобработка». Вып. 32), с. 103—105.
39. Doi T. — «Nippon Kindzoku Gakkaishi», 1957, v. 21, p. 337—339.
40. Захаров М. В., Королев Ф. В., Игнатьев В. А. — «Цветные металлы», 1976, № 12, с. 73—74.
41. Николаев А. К., Новик Ф. С. — «Бюл. ин-та Цветметинформация», 1975, № 18, с. 38—39.
42. Новик Ф. С., Николаев А. К., Розенберг В. М., Лазарев Г. П. — «Об актуальных вопросах современной металлургии». М., «Металлургия», 1976 (ВЗПИ. Вып. 98), с. 107—117.
43. Taubenblat R. W., Opil W. R., Hsu V. T. — «Metals Eng. Quarterly», 1972, № 11, p. 41—44.
44. Opil W. R., Hsu V. T., Smith R. Y. — «J. Inst. of Metals», 1970, v. 98, № 6, p. 70—73.
45. Бочвар А. А. Металловедение. М., Металлургиздат, 1956. 495 с. с ил.
46. Даниеля Е. П., Розенберг В. М. — Металловедение меди и медных сплавов. М., «Металлургия», 1975 («Гипроцветметобработка». Вып. 48), с. 84—91.
47. Николаев А. К. — В кн.: Справочник металлиста. Т. 2. М., «Машиностроение», 1976, с. 459—463 с ил.

ИБ № 1331

Александр Константинович Николаев
Владимир Моисеевич Розенберг

СПЛАВЫ ДЛЯ ЭЛЕКТРОДОВ КОНТАКТНОЙ СВАРКИ

Редактор издательства Э. М. Ш е р б и н н а
Художественный редактор Г. А. Ж е г и н
Технический редактор Т. Б. Т о к м а к о в а
Корректоры В. Б. Л е в и н, Э. С. К о р ч а г и н а
Обложка художника В. В. З о р о в к а

Сдано в набор 30.12.77
Подписано в печать 31.03.78
Т-07906
Формат бумаги 84×108¹/₃₂
Бумага типографская № 3
Гарнитура литературная

Печать высокая
Усл. печ. л. 5,04
Уч.-изд. л. 5,78
Тираж 6300 экз.
Заказ 76
Цена 30 коп.

Изд. № 3583

Издательство «Металлургия», 119034, Москва, Г-34,
2-й Обыденский пер., д. 14

Подольский филиал ПО «Периодика» Союзполиграфпрома
при Государственном комитете Совета Министров СССР
по делам издательства, полиграфии и книжной торговли
г. Подольск, ул. Кирова, д. 25