



Д.М. Рабкин
В.Г. Игнатьев
И.В. Довбищенко

**Дуговая
сварка
алюминия
и его сплавов**



МОСКВА
« МАШИНОСТРОЕНИЕ » 1982

Редакционная коллегия:
А. Е. Аснис — председатель, Д. М. Рабкин, С. М. Гуревич, А. Е. Марченко, В. И. Галинич, В. И. Махненко, В. Ф. Мусяченко

Рецензент В. М. Никитин

Рабкин Д. М., Игнатьев В. Г., Довби-
щенко И. В.

P12 Дуговая сварка алюминия и его
сплавов. — М.: Машиностроение, 1982. —
95 с., ил. — (Б-ка электросварщика).

25 к.

В книге приведены характеристики свариваемых алюминевых сплавов, свойства сварных соединений. Описаны дефекты при сварке и способы их выявления и предупреждения, способы подготовки деталей под сварку, технология ручной, полуавтоматической и автоматической сварки, оборудование для сварки и необходимый контроль качества сварных соединений. Рекомендованы режимы сварки алюминиевых сплавов и требуемые при этом марки присадочной проволоки в зависимости от толщины свариваемых элементов и способа сварки.

Книга рассчитана на рабочих-электросварщиков и мастеров-технологов сварочного производства.

Р 2704060000-093 93-82
038(01)-82

ББК 34.641
6П4.3

Большинство промышленных сплавов представляет собой сложные системы. Помимо основных легирующих элементов различного рода они включают примеси, оказывающие большое влияние на технологические и прочностные характеристики материала. Легирующие элементы: медь, магний, марганец, кремний. Сопутствующие примеси: железо, тот же кремний, если он не входит в число легирующих. В зависимости от состава и количества легирующих элементов и примесей, различают деформируемые и литейные сплавы (табл. 1, 2). Суммарное содержание легирующих элементов и примесей в деформируемых сплавах не превышает 8%. Полуфабрикаты из таких сплавов получают прессованием, прокаткой, штамповкой и ковкой.

Деформируемые алюминиевые сплавы условно разделены на две группы — термически упрочняемые и термически неупрочняемые. К термическому упрочнению склонны сплавы алюминия с медью, кремнием, цинком и другими элементами. Технический алюминий и алюминиевые сплавы с магнием и марганцем термическим путем не упрочняются. К числу термически неупрочняемых сплавов относят технический алюминий (АДО, АД1), алюминий-марганцевые сплавы (АМц, АМцС) системы Al—Mn, сплавы систем Al—Mg и Al—Mg—Mn (АМг2—АМг6, ММ). К термически упрочняемым относят сплавы системы Al—Mg—Si (АВ, АД31, АД33), называемые также авиалами; сплавы системы Al—Cu—Mg—(Mn), называемые дуралюминами (Д1, Д16, 1201 и др.); сплавы системы Al—Zn—Mg—(Cu) (1915) и др.

Технический алюминий содержит в сумме не более 0,7% примесей железа и кремния. Эти примеси частично растворены в алюминии, а часть их выделена в виде самостоятельных интерметаллических включений. Временное сопротивление σ_b технического алюминия 80—100 МПа (табл. 3). Легирование алюминия марганцем или магнием способствует повышению его прочности. Дополнительного упрочнения, как и для технического алю-

Маркировка и состав свариваемых деформируемых

Буквенное обозначение	Цифровая маркировка	Стандарт	Состав, %		
			Cu	Mg	Mn
Система Al					
A995	—	ГОСТ 11069-74	<0,001	—	—
A99	—	ГОСТ 11069-74	<0,003	—	—
AD00	1010	ОСТ 1-92014-76***	<0,015	<0,03	<0,02
A7	—	ГОСТ 11069-74	<0,01	—	—
AD0	1011	ГОСТ 4784-74	<0,02	<0,05	<0,025
A5	—	ГОСТ 11069-74	<0,02	—	—
AD1	1013	ГОСТ 4784-74	<0,05	<0,05	<0,025
Система Al—Mn					
MM	1403	ГОСТ 4784-74	<0,2	0,2—0,5	1,0—1,4
AMц	1400	ГОСТ 4784-74	<0,15	<0,2	1,0—1,6
AMцС	1401	ГОСТ 4784-74	<0,1	<0,05	1,0—1,4
Система Al—Mg—Mn					
AMг1	1510	ГОСТ 4784-74	<0,1	0,4—1,7	<0,2
AMг2	1520	ГОСТ 4784-74	<0,1	1,8—2,6	0,2—0,6
AMг3	1530	ГОСТ 4784-74	<0,1	3,2—3,8	0,3—0,6
AMг4	1540	ГОСТ 4784-74	<0,1	3,8—4,6	0,5—0,8
AMг5	1550	ГОСТ 4784-74	<0,1	4,8—5,8	0,3—0,8
AMг6	1560	ГОСТ 4784-74	<0,1	5,8—6,8	0,5—0,8
AMг6пч*	—	ОСТ 1-90026-71***	<0,05	5,8—6,8	0,5—0,8
AMг61	1561	ОСТ 1-92014-76***	<0,1	5,5—6,5	0,7—1,1
Система Al—Mg—Si					
AD31	1310	ГОСТ 4784-74	<0,1	0,4—0,9	<0,1
AD33	1330	ГОСТ 4784-74	0,15—0,40	0,8—1,2	<0,15
AD35	1350	ГОСТ 4784-74	<0,1	0,8—1,4	0,5—0,9
AB	1340	ГОСТ 4784-74	0,1—0,5	0,45—0,90	0,15—0,35
ABч**	—	ОСТ 1-92014-76***	<0,05	0,6—1,0	<0,05
Система Al—ML—Li					
—	01420	ТУ 1-92-28-76***	—	4,5—6,0	<0,3
Система Al—Zn—Mg					
—	1915	ГОСТ 4784-74	<0,1	1,3—1,8	0,2—0,6
Система Al—Cu—Mn					
D20	1201	ОСТ 1-90048-77***	5,8—6,8	<0,02	0,2—0,4

* Сплав повышенной чистоты (пч) по примесям Fe, Si и другим контролируемым элементам.
 ** Сплав чистый по примесям Fe, Si и другим контролируемым элементам.
 *** ОСТы и ТУ по [4].

Таблица 1

алюминиевых сплавов (алюминий — основа)

Состав, %						
Fe	Si	Zn	Ti	Zr	Cr	Be
<0,0015	<0,0015	<0,001	<0,001	—	—	—
<0,003	<0,003	<0,003	<0,002	—	—	—
<0,16	<0,16	<0,08	<0,05	—	—	—
<0,16	<0,16	<0,04	<0,02	—	—	—
<0,30	<0,30	<0,1	<0,1	—	—	—
<0,30	<0,30	<0,06	<0,03	—	—	—
<0,30	<0,30	<0,1	<0,15	—	—	—
<0,6	<1,0	<0,1	<0,1	—	—	—
<0,7	<0,6	<0,1	<0,2	—	—	—
0,25—0,45	0,15—0,35	<0,1	<0,1	—	—	—
<0,10	<0,10	—	—	—	—	—
<0,4	<0,4	<0,2	<0,1	—	<0,05	—
<0,5	0,5—0,8	<0,2	<0,1	—	<0,05	—
<0,4	<0,4	<0,2	0,02—0,10	—	0,05—0,25	0,0002—0,005
<0,5	<0,5	<0,2	0,02—0,10	—	—	0,0002—0,005
<0,4	<0,4	<0,2	0,02—0,10	—	—	0,0002—0,005
<0,15	<0,1	<0,2	0,02—0,10	—	—	0,0002—0,005
<0,4	<0,4	<0,2	—	0,02—0,12	—	0,0001—0,003
<0,5	0,3—0,7	<0,2	<0,15	—	—	—
<0,7	0,4—0,8	<0,25	<0,15	—	0,15—0,35	—
<0,5	0,8—1,2	<0,2	<0,15	—	—	—
<0,5	0,5—1,2	<0,2	<0,15	—	—	—
<0,12	0,35—0,55	<0,0,5	—	—	—	—
0,1—0,3	0,1—0,3	1,7—2,3Li	<0,1	0,09—0,15	—	<0,001Na
<0,4	<0,3	3,4—4,0	<0,1	0,15—0,22	0,08—0,20	—
<0,3	<0,2	<0,1	0,02—0,1	0,10—0,25	0,05—0,15V	—

лируемым элементам.
 не менее чистый, чем сплавы повышенной чистоты.

Таблица 2

Состав (%) некоторых алюминиевых литейных сплавов по ГОСТ 2685—75 (остальное алюминий)

Марка	Mg	Si	Mn	Cu	Ni	Ti	Fe	Zr
АЛ2	—	10,0—13,0	—	—	—	—	—	—
АЛ4	0,17—0,3	8,0—10,5	0,2—0,5	—	—	—	—	—
АЛ9	0,2—0,4	6,0—8,0	—	—	—	—	—	—
АЛ3	0,35—0,6	4,5—5,5	0,6—0,9	1,5—3,0	—	—	—	—
АК5М7 (АЛ10В)	0,2—0,5	4,5—6,5	—	6,0—8,0	—	—	—	—
АЛ19	—	—	0,6—1,0	4,5—5,3	—	0,15—0,35	—	—
АЛ8	9,5—10,0	—	—	—	—	—	—	—
АЛ27	9,5—10,5	—	—	—	—	0,05—0,15	0,05—0,15	0,05—0,20
АЛ29	6,0—8,0	0,5—1,0	0,25—0,60	—	—	—	—	—
АЛ25	0,8—1,3	11,0—13,0	0,3—0,6	1,5—3,0	0,8—1,3	0,05—0,20	—	—
АЛ30	0,8—1,3	11,0—13,0	—	0,8—1,5	0,8—1,3	—	—	—

миния, можно достичь нагартовкой. Однако применение нагартованного металла в сварных конструкциях менее удобно, чем использование ненагартованного или отожженного. Нагартованный металл, в особенности с повышенным содержанием легирующих примесей, труднее деформировать при изготовлении заготовок под сварку. Кроме того, эффект нагартовки легко снимается сварочным нагревом. Временное сопротивление сплава АМг6 в отожженном и нагартованном состояниях 320 и 380 МПа соответственно.

Максимальную прочность термически упрочняемых сплавов получают в результате закалки и последующего старения. В закаленном и состаренном сплаве упрочнение обеспечивается образованием зон Гинье—Престона (зонное упрочнение) или мелкодисперсных фаз (фазовое упрочнение). В зависимости от состава сплава закалку нагретого до 500—525°С материала осуществля-

Таблица 3

Механические свойства алюминиевых сплавов (типичные)

Марка	Деформируемые сплавы				Литейные сплавы				Твердость по Бриггсу, НВ		
	Вид термообработки	Временное сопротивление, МПа	Условный предел текучести, МПа	Относительное удлинение, %	Твердость по Бриггсу, НВ	Марка	Способ литья	Вид термобработки		Временное сопротивление, МПа	Относительное удлинение, %
АД1	М	80	30	35	25	АЛ2	ЗМ, ОМ, ВМ, КМ	—	150	4	50
	П	120	80	15	30			—	160	2	50
АМс	М	120	50	23	30	АЛ4	З, О, В, К, Д	—	150	2	50
	П	180	130	10	40			—	200	1,5	70
АМг2	М	190	90	23	45	АЛ9	З, О, В, К, Д	Т2	160	2	50
	П	250	210	8	68			—	190	4	50
АМг3	М	235	120	22	58	АЛ3	З, О, В, К, Д	Т4	170	0,5	65
	М	270	140	23	—	АК5М7 (АЛ10В)	З, О, В, К, Д	—	130	—	80
	М	300	160	20	65			—	160	—	80
АМг5	М	340	170	20	—	АЛ19	З, О, В, К, Д	Т4	300	8	70
	М	360	170	12	—			—	340	4	90
АМг6	М	360	280	6	—	АЛ8	З, О, В, К, Д	Т3	320	9	90
	П	380	200	10	80	АЛ27	З, О, В, К, Д	Т4	320	12	75
АД31	Т1	240	200	10	—			—	210	3	60
АД33	Т1	240	140	20	65	АЛ29	Д	—	190	—	90
	Т1	340	270	12	95	АЛ25	К	Т1	200	0,5	90
АВ	Т1	350	290	12	—			—	—	—	—
Д20	Т1	420	300	11	100	АЛ30	К	Т1	—	—	—
Д201	Т1	420	300	12	—			—	—	—	—
Д201	Т1	420	300	12	—			—	—	—	—
Д201	Т1	380	250	8	—			—	—	—	—

Примечание. Деформируемые сплавы: Т — закаленный и естественно состаренный; П — закаленный и искусственно состаренный; Н — нагартованный; П — полуннагартованный; М — отожженный. Литейные сплавы: З — литье в песчаные формы; О — литье в оболочковые формы; В — литье по выплавляемым моделям; К — кокиль; Д — литье под давлением; М — модифицирование; Т2 — искусственное старение без предварительной закалки; Т4 — закалка; Т3 — закалка; Т3 — закалка и кратковременное (неполное) искусственное старение.

ют погружением его в воду. При этом создается пересыщенный твердый раствор алюминия. При последующей выдержке на воздухе и комнатной температуре (естественное старение) или при температуре 100—190°C (искусственное старение) прочность полуфабрикатов повышается в 2—2,5 раза. Временное сопротивление термически упрочняемых сплавов достигает 400—500 МПа и более. Механические свойства искусственно состаренных сплавов системы Al—Mg—Si чувствительны к перерыву между закалкой и искусственным старением. Чем дольше перерыв, тем ниже эффект старения. Перерыв в 10 и максимум в 15 сут снижает эффект старения на 20—30 МПа.

Чем меньше примесей в алюминиевом сплаве, тем, как правило, выше его пластичность. Технический алюминий, алюминиево-марганцевый и низколегированные сплавы с магнием вплоть до AMg5 легко деформируются в холодном состоянии. Образцы сплава AMg6 в зависимости от толщины, содержания сопутствующих примесей могут быть изогнуты на 100—180°. Термически упрочняемые сплавы допускают деформацию только в закаленном состоянии, а в состаренном состоянии изгибу не подлежат. Их можно деформировать после небольшого нагрева (150—200°C).

Вследствие нагрева до более высоких температур происходит превращение зон Гинье—Престона или мелкодисперсных фаз в крупные включения, что в условиях сварки является практически необратимым процессом и ведет к потере прочности. Исключение составляют сплавы системы Al—Zn—Mg. Пересыщенный твердый раствор в этих сплавах сохраняется при сравнительно малых скоростях охлаждения от температуры заковки, например на воздухе («самозакалывающиеся» сплавы). Прочность металла шва и зоны термического влияния сварного соединения восстанавливается в результате естественного (продолжительностью 3—30 сут и более) или искусственного старения.

Литейные сплавы в значительных количествах содержат кремний, медь, цинк (табл. 2). Суммарное содержание легирующих элементов составляет 10—15% и более. Вследствие этого деформация такого материала становится затруднительной, а различного рода детали (отливки) получают исключительно методами литья.

В связи с тенденцией замены черных металлов алюминием и его сплавами во многих отраслях техники, строительства и транспорта эту замену следует осуществлять с учетом технико-экономических преимуществ того или иного сплава перед сталью. При использовании алюминиевых сплавов необходимо также учитывать их коррозионную стойкость и свариваемость.

Коррозионная стойкость алюминия и его сплавов определяется наличием на поверхности изделий плотной окисной пленки. Алюминий совершенно нетоксичен, чем определяется широкое применение его в пищевой промышленности. Он весьма стоек в окислительных средах. В связи с этим его используют в сосудах для транспортировки и получения азотной кислоты и т. п. Как правило, чем меньше примесей в техническом металле, тем выше его коррозионная стойкость. Алюминий и его сплавы совершенно непригодны для работы в щелочной среде.

Под свариваемостью понимают совокупность свойств, определяющих возможность получения сварных соединений определенного качества при данном способе сварки. Чем легче получаются качественные соединения, тем выше свариваемость сплава. Многогранное понятие «свариваемость» включает склонность сплавов к образованию трещин, пористости, механические свойства сварных соединений, коррозионную стойкость и пр. При сварке плавлением свариваемость зависит от химического состава сплава и его структуры, которая создается в результате металлургического передела слитка. Среди физико-химических характеристик металла наибольшее влияние на свариваемость оказывают наличие окисной пленки, химический состав, теплопроводность, температура плавления, плотность.

Теплопроводность характеризует скорость отвода теплоты от источника нагрева. Теплопроводность алюминия и его сплавов в 3—3,5 раза выше, чем стали. Легирующие и сопутствующие примеси снижают теплопроводность металла. При плавлении основного металла этот показатель оказывается часто более важным, чем температура плавления. Температура плавления чистейшего алюминия 660°C, т. е. в 2 раза ниже температуры плавления стали. Температура плавления сплавов еще ниже. Однако несмотря на более низкую темпера-

туру плавления, для получения сварного шва на алюминии из-за больших потерь теплоты в толщу свариваемого металла требуется вложение такого же количества теплоты, как и для стали (или больше). Особенно это проявляется при малых скоростях процесса. Поэтому для сварки алюминия требуются мощные источники теплоты, позволяющие на малом участке выделять большие количества энергии (концентрированные источники нагрева).

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ И КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ АЛЮМИНИЯ

Конструкции из алюминия и его сплавов рекомендуются изготавливать в специализированных цехах (участках). Температура в помещении должна быть не ниже 5°C, запыленность воздуха не должна превышать 2 мг/м³.

Удаление окисной пленки с поверхности свариваемого металла и проволоки. Основное препятствие для сварки алюминия и его сплавов — окисные пленки. Они покрывают поверхность соединяемых кромок и проволоки. Температура плавления окиси алюминия 2050 °C. Попавшие в металл пленки окиси алюминия снижают его прочность и другие эксплуатационные характеристики. В естественных условиях производства и хранения алюминий покрывается слоем окиси, предохраняющим его от коррозии. На воздухе зачищенная поверхность сразу же покрывается новым слоем окиси, толщина которого восстанавливается практически в течение нескольких дней, надежно защищая металл от дальнейшего окисления. Естественная защитная пленка имеет значительную толщину и ее удаление в процессе сварки весьма затруднительно. Поэтому поверхность соединяемых деталей и проволоки очищают от слоя окиси непосредственно перед сваркой и создают на ней искусственный слой окиси, который сохраняется достаточно тонким в течение 8—16 ч. Полученный тонкий слой окиси алюминия сравнительно легко удаляется электрической дугой или с помощью флюса во время сварки.

В производственной практике широкое распространение получил следующий процесс подготовки алюминиевых деталей и про-

волоки к сварке. Прежде всего их поверхность очищают от консервирующей смазки и загрязнений, протирая ее ветошью, смоченной в бензине, уайт-спирите и других органических растворителях. В серийном производстве свариваемые детали обычно обезжириваются в негорячем водном растворе, содержащем 5—10 г/л NaOH, 40—50 г/л тринатрийфосфата, 5 г/л натриевого жидкого стекла (Na₂SiO₃). Продолжительность процесса обезжиривания зависит от степени загрязненности поверхности металла и температуры. При температуре раствора 60—70 °C время обезжиривания обычно не превышает 3—5 мин. После обезжиривания детали или проволоку погружают в 5%-ный водный раствор щелочи NaOH или KOH, нагретый до температуры 60—70 °C. В результате взаимодействия со щелочью окисная пленка стравливается с поверхности в течение 2—3 мин. После этого остатки щелочи и продукты реакции смывают с поверхности деталей сначала горячей, а затем холодной водой, одновременно протирая их волосяными щетками. Сразу же после промывки детали пассивируют в 20%-ной азотной кислоте (HNO₃), нагретой до температуры 60—70 °C. За 5—7 мин пребывания в растворе поверхность деталей покрывается новым, более плотным слоем окиси алюминия. Извлеченные из азотной кислоты детали промывают в холодной, а затем в горячей воде и сушат подогретым воздухом.

Так как в атмосферных условиях толщина образованной пленки, хотя и более медленно, но все же увеличивается, подготовленные к сварке детали необходимо сварить в течение 24 ч, а сварочную проволоку использовать в течение 8 ч. Различие в сроке хранения подготовленных к сварке деталей и проволоки обусловлено тем, что непосредственно перед сваркой соединяемые кромки деталей дополнительно очищают от окисных пленок механическим путем — проволоочной щеткой, а затем шабером. Образовавшаяся после шабрения тончайшая пленка окиси легко удаляется сварочной дугой, горячей в среде инертных газов. Весьма эффективно происходит удаление окиси с поверхности металла, имеющего отрицательный потенциал. Присутствующие в дуге положительные ионы инертных газов разгоняются катодным напряжением и ударяют в поверхностный слой окисной пленки. Процесс обработки свариваемого металла положительными ионами, так называемое катодное распыление, хорошо просматривается впереди сварочной ванны, а его результаты остаются в виде беловатых полос по сторонам шва.

Менее эффективно удаление окиси алюминия с поверхности свариваемого металла, когда он имеет положительный потенциал. В этом случае окись алюминия разрушается при взаимодействии с расплавленным алю-

минием, в результате которого образуется газообразный субокисел Al_2O . Поскольку эта реакция возможна только при температурах свыше $1700^\circ C$, область очищенной поверхности практически ограничена анодным пятном. Тем не менее при использовании в качестве защитного газа гелия процесс термической очистки свариваемых кромок достаточно надежен и реализован при сварке алюминия постоянным током прямой полярности. Применение для этого процесса аргона затруднено необходимостью стабильного поддержания дугового промежутка, соизмеримого с суммарной длиной катодной и анодной областей дуги.

При ручной дуговой сварке покрытыми электродами и автоматической дуговой сварке по слою флюса расплавленный алюминий защищают от окружающей атмосферы флюсами из хлоридов и фторидов щелочных и щелочно-земельных металлов, которые под действием дуги расплавляются и энергично реагируют с окисью алюминия, образуя комплексные соединения, переходящие в шлак. Применяемые флюсы, как правило, при комнатных температурах вызывают коррозию, поэтому их остатки тщательно удаляют с поверхности сваренных изделий, протирая загрязненные участки волосяными щетками в струе горячей воды или пара. Хорошо удаляются остатки флюса при погружении изделия в подогретую 5%-ную азотную кислоту. Так как очищающее действие дуги ограничено глубиной ее проникновения в соединяемый металл, конструкция соединений, технология и режим сварки должны обеспечивать дуге более глубокое проникновение в свариваемые элементы. Глубину проникновения дуги обычно регулируют, изменяя силу сварочного тока.

При обычных условиях сварки алюминия и его сплавов максимальный сварочный ток, как правило, не превышает 550—750 А. Увеличение сварочного тока свыше этих критических значений мгновенно нарушает процесс формирования шва, его поверхность покрывается морщинистыми складками, а глубина проплавления свариваемого металла резко уменьшается. Причины этого явления недостаточно изучены, однако известно, что величина критического тока зависит от качества защиты поверхности сварочной ванны инертным газом, его состава, а также от состава и толщины свариваемых элементов. Для гарантии стабильности про-

цесса сварки на максимальных токах величина рабочего тока должна быть меньше критического на 20—30 А. Если этого тока недостаточно для полного проплавления соединяемых элементов, их сваривают с двух сторон так, чтобы противоположные швы перекрывали друг друга.

В тех случаях, когда двусторонняя сварка невыполнима или экономически нецелесообразна, делают одностороннюю разделку кромок, которая позволяет дуге глубже проникнуть в соединение. Так как погруженная в разделку дуга не может удалить окисную пленку со всей поверхности соединяемых кромок, сварку выполняют за два прохода и более. При этом перед сваркой каждого шва следует механически тщательно удалить окись алюминия с поверхности соединяемых кромок и предыдущих швов. При сварке металла толщиной 20 мм и более используют соединения с двусторонней разделкой кромок. Форма разделки и глубина притупления кромок определяются способом и особенностями технологии сварки.

Весьма затруднительно удаление окисных пленок из корня шва при односторонней сварке стыковых соединений в нижнем положении, требующей применения подкладок, предотвращающих вытекание расплавленного металла из сварочной ванны. Для этих целей используют удаляемые подкладки из коррозионно-стойкой стали, меди и других металлов с повышенной температурой плавления, а также остающиеся подкладки из свариваемого алюминиевого сплава. Чтобы получить нормальное формирование шва, подкладка должна плотно прилегать к нижней поверхности свариваемых кромок. Зазор между ними не должен превышать 0,5—1 мм. В этих условиях мощная дуга, способная очистить корень шва от окисных пленок, неизбежно будет касаться поверхности подкладки. Под действием дуги поверхность подкладки оплавляется, а входящие в ее состав элементы загрязняют металл шва, ухудшая эксплуатационные свойства соединений. Искусственное охлаждение подкладки предохраняет ее от разрушения дугой, но затрудняет полное удаление пленок окиси из корня соединения, так как при плотном прилегании свариваемого металла к подкладке температура соприкасающихся поверхностей будет практически одинакова. В этих условиях для разогрева нижней кромки соединя-

мых поверхностей до температуры плавления требуется более мощная дуга, которая увеличит объем металла сварочной ванны и ширину шва. Кроме того, в случае проникновения такой дуги на подкладку нарушится стабильность процесса сварки. В связи с этим для удаления окисных пленок из корня стыкового соединения обычно используют подкладку с канавкой, расположенной под состыкованными кромками. Канавка препятствует отводу теплоты из свариваемых кромок в подкладку и способствует опусканию окисных пленок вместе с расплавленным металлом сварочной ванны в нижнюю часть усиления шва (рис. 1).

Вероятность полного удаления окисных пленок с торцовых поверхностей свариваемых кромок повышается с увеличением глубины канавки. В то же время слишком глубокая канавка требует дополнительного расхода сварочной проволоки для ее заполнения, а чрезмерно высокий валик на обратной стороне шва будет способствовать концентрации напряжений в зоне сплавления. На практике обычно применяют подкладки с глубиной канавки 1,2—2 мм. При правильно выбранном и стабильном режиме сварки такая глубина канавки более чем в 1,5 раза превышает высоту оставшихся под дугой окисных пленок и обеспечивает их полное удаление в поверхностный слой нижнего усиления шва. Канавка должна иметь достаточную ширину, чтобы обеспечить нормальное прогибание окисных пленок на нижней поверхности состыкованных кромок в условиях возможного смещения стыка в процессе сварки.

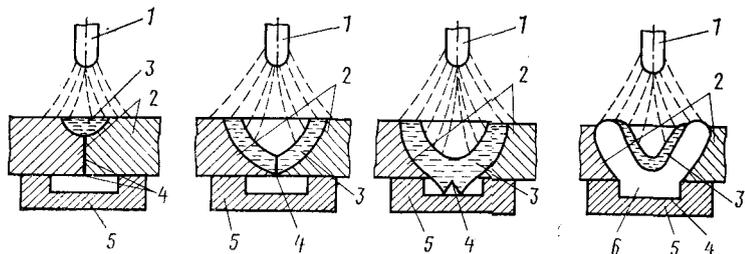


Рис. 1. Схема удаления окисных пленок из корня шва при односторонней сварке стыковых соединений на подкладке с канавкой: 1 — электрод; 2 — свариваемый металл; 3 — расплавленный металл сварочной ванны; 4 — окисные пленки на поверхности соединяемых кромок; 5 — подкладка с канавкой; 6 — металл шва

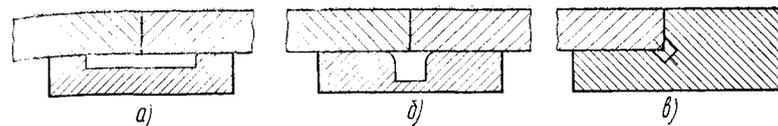


Рис. 2. Форма поперечного сечения канавки в подкладке, формирующей обратную сторону стыкового шва:

а — прямоугольная; б — квадратная со скругленными краями; в — квадратная, наклонная

В зависимости от толщины свариваемых кромок, способа дуговой сварки и условий изготовления конструкции ширина канавки в подкладке составляет 70—90% ширины верхнего усиления шва, но не меньше 5—6 мм. Чаще всего используют канавки прямоугольной формы (рис. 2, а), которые обеспечивают стабильные условия для формирования шва и удаления окисных пленок при довольно значительных смещениях линии стыка и дуги от оси канавки. Весьма рациональна канавка, поперечное сечение которой показано на рис. 2, б. При соответствии размеров канавки режиму такое сечение канавки обеспечивает плавный переход от усиления шва к свариваемому элементу. К сожалению, из-за малой ширины такую канавку применяют вместе с оснасткой, обеспечивающей удержание состыкованных кромок по центру канавки. Для удаления окисных пленок в стыковых соединениях с оставшейся подкладкой, изготовленной как единое целое со свариваемым элементом, используют прямоугольные и наклонные канавки (рис. 2, в), которые более просты в изготовлении. Кроме удаления окисных пленок такая канавка уменьшает теплоотвод от сварочной ванны в сторону более толстого элемента замкового соединения.

Необходимость в одинаковом отводе теплоты в свариваемые элементы обусловлена повышенным коэффициентом теплопроводности алюминия и его сплавов, который больше чем у железа почти в 3 раза. При таком коэффициенте теплопроводности различие в толщине свариваемых кромок может стать причиной преждевременного расплавления более тонкого элемента или привести к образованию несплавления со стороны утолщенной кромки соединения.

Методы повышения качества металла шва и уменьшения сварочных деформаций. Чтобы получить техно-

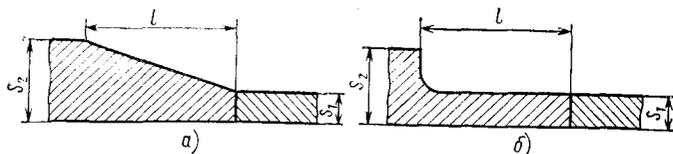


Рис. 3. Стыковое соединение металла разной толщины: а — допускаемое; б — рекомендуемое

логичное соединение, свариваемые кромки разной толщины элементов должны иметь одинаковую толщину (рис. 3). Для стыковых соединений ширину утоненной части более массивного элемента можно ориентировочно определить по формуле

$$l = 10 \frac{S_1}{S_2} (S_2 - S_1).$$

При конструировании торцовых, угловых и других соединений также желательно иметь свариваемые кромки одинаковой толщины. Примеры торцовых соединений при сварке тонкостенных труб в толстую плиту показаны на рис. 4.

В связи с высокой теплопроводностью алюминиевых сплавов при ручных способах сварки металла толщиной свыше 8—10 мм для соблюдения нормального режима сварки и исключения пор в металле шва применяют предварительный и сопутствующий подогрев.

Иногда с целью уменьшения пористости подогрев оказывается целесообразным и при автоматических способах сварки металла средних и больших толщин. В этом случае увеличивается продолжительность существования сварочной ванны и создаются условия для более полного удаления из нее газовых пузырьков. Для устранения адсорбированной влаги с поверхности

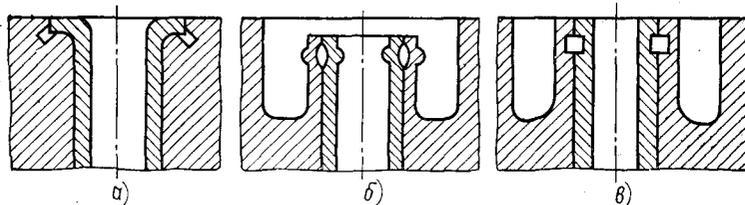


Рис. 4. Соединение трубы с трубной доской: а — замковое; б — торцовое с канавкой, полученное гибкой; в — то же, полученное резанием

свариваемые кромки подогревают до температуры 40—50°C, используя газовые горелки (восстановительное пламя), горячий воздух, электроконтактные нагреватели.

Температура и время подогрева зависят от марки и толщины свариваемого металла (табл. 4). Температу-

Таблица 4

Максимальная температура подогрева некоторых алюминиевых сплавов

Сплав	Толщина металла, мм	Температура, °C	Продолжительность нагрева, мин
А99, АЛ0, АД1	Любая	350	60
АМц	»	250	60
АМг3, АМг4, АМг5	≤ 12 ≥ 12	100 150	30 10
АД31, АД33, АВ	≤ 12 ≥ 12	180 200	60 30
1915	≤ 12 ≥ 12	140 160	30 20

ру контролируют с помощью контактных термопар или термокарандашей.

В связи со свойственными алюминию и его сплавам высокими значениями коэффициентов теплопроводности и линейного расширения $[\alpha = (21 \div 24,7) 10^{-6} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}]$ существенно искажается форма и изменяются размеры сварных конструкций. При этом уровень их деформаций в 1,5—2 раза выше, чем у аналогичных стальных конструкций. Чтобы обеспечить алюминиевым конструкциям требуемые форму и размеры, используют конструктивные и технологические методы уменьшения сварочных деформаций. При конструировании сварных узлов обычно применяют стыковые соединения, обладающие лучшей работоспособностью и имеющие меньшую склонность к деформациям. Сквозное проплавление стыковых соединений вызывает их поперечную и продольную усадку. Укорочение соединяемых элементов учитывают с помощью припуска на их усадку или же предусматривают возможность механической обра-

ботки соединений до требуемого размера после сварки. Поперечное укорочение (см) стыковых соединений листов ориентировочно определяют из уравнения

$$\Delta_{\text{п}} = k\eta_{\text{н}}IU\alpha/v_{\text{св}}Sc\gamma,$$

где $\eta_{\text{н}}$ — эффективный коэффициент полезного действия процесса нагрева изделия дугой; I — сварочный ток, А; U — напряжение сварочной дуги, В; $v_{\text{св}}$ — скорость сварки, см/с; S — толщина свариваемых листов, см; α — коэффициент линейного расширения, $^{\circ}\text{C}^{-1}$; c — удельная теплоемкость, Дж/(г $\cdot^{\circ}\text{C}$); γ — плотность, г/см 3 ; k — коэффициент, учитывающий состав свариваемого металла, для алюминиевых сплавов $k=1,3\div 1,4$.

Продольная свободная усадка стыкового шва существенно затруднена наличием более холодного металла с обеих сторон сварочного шва. В результате продольные укорочения значительно меньше поперечных и учитываются только при сварке элементов, ширина которых меньше их 50-кратной толщины. При этом каждый метр длины шва сокращается не более чем на 0,4 мм. В стыковых соединениях с несимметричным расположением шва усадка свариваемых элементов может сопровождаться деформациями изгиба. Особенно велика опасность их появления под действием продольной усадки стыковых соединений, у которых один из элементов имеет ширину, соизмеримую с шириной зоны термического влияния. После сварки такие соединения имеют продольную саблевидность шва. Для обеспечения прямолинейности шва поперечные сечения соединяемых элементов должны быть симметричными. Вблизи конечных участков стыковых швов в результате поперечных и продольных укорочений также происходит стягивание передней и задней кромок. При близком расположении нескольких таких участков утянутая кромка приобретает волнистость, которую проще всего устранить механическим торцеванием кромок.

Малая жесткость стыковых соединений плоских элементов по толщине часто вызывает потерю ими устойчивости с образованием продольных и поперечных прогибов. Этому способствует температурно-временное расширение металла вокруг сварочной ванны и его последующая усадка при охлаждении. Прогиб при по-

тере устойчивости зависит от ширины зоны упругопластических деформаций и особенно от протяженности шва. Наибольший прогиб обычно имеет середина соединения. Часто прогиб уменьшают, увеличивая жесткость свариваемых пластин параллельными или поперечными гофрами. Параллельные гофры располагают за пределами зоны пластических деформаций. Поперечные гофры разбивают шов на менее протяженные участки и частично поглощают продольные перемещения свариваемых элементов.

Весьма эффективно предотвращает продольный прогиб соединений предварительный обратный выгиб свариваемых элементов посредством их прижатия к специальному ложементу. Обратный выгиб обычно подбирают опытным путем в зависимости от усилия прижатия и технологии сварки. Уровень угловых деформаций стыковых соединений определяется несимметричностью поперечного сечения шва. Деформация минимальна при одинаковой ширине шва на лицевой и обратной стороне. У стыковых соединений металла большой толщины, который сваривают с разделкой кромок, соединения с симметричной двусторонней разделкой кромок менее склонны к деформациям.

Особенно значительны угловые деформации при сварке тавровых и нахлесточных соединений, асимметрия шва которых определена самой формой соединений. У таких соединений уровень угловых деформаций повышается с увеличением катетов шва. Наиболее просто и достаточно эффективно уменьшает угловые деформации сборка соединяемых элементов с упреждающим углом, который приблизительно равен по величине и противоположен по направлению углу поворота соединяемых элементов после сварки. Поперечные и продольные укорочения тавровых и нахлесточных соединений существенно меньше, чем у стыковых, так как угловые швы проплавливают только часть толщины соединяемых элементов. Чем меньше глубина и ширина их проплавления, тем меньшие укорочения имеют тавровые и нахлесточные соединения. Припуск на поперечное укорочение листов в тавровых и нахлесточных соединениях зависит от количества выполняемых швов и определяется как сумма укорочений от каждого шва. Для соединяемых элементов, ширина которых более чем в 50 раз превышает их толщину, продольное укорочение от наплавлен-

ных угловых швов, как правило, не учитывают. Применение прерывистых швов для уменьшения остаточных деформаций при сварке алюминиевых сплавов ограничено их повышенной склонностью к образованию горячих трещин. В связи с этим для уменьшения деформаций малонагруженные соединения целесообразно сваривать не прерывистым, а сплошным швом с уменьшенным поперечным сечением.

Широкое распространение получили технологические методы уменьшения сварочных деформаций, которые сравнительно легко применить в процессе изготовления конструкции. Выбранная технология сборки и сварки соединения должна обеспечить получение минимально возможной ширины зоны термического влияния. Для этого стремятся использовать методы сварки, обеспечивающие высокую концентрацию энергии в дуге, а соединения сваривают на повышенных скоростях. В случае сварки стыковых соединений необходимо обеспечивать симметричную форму поперечного сечения шва и минимально проплавливать свариваемые элементы в нахлесточных и угловых швах. Важное значение для уменьшения деформаций соединений имеет качество сборки. Наличие между соединяемыми элементами зазоров и превышений увеличивает объем сварочной ванны и, как следствие этого, остаточные деформации соединений. В процессе сварки под действием температурно-временных деформаций соединяемые кромки могут смещаться относительно друг друга, образуя зазоры и превышения даже в тех местах, где их не было после сборки.

Чтобы предотвратить смещение собранных кромок при сварке листов толщиной 3—4 мм, их прижимают к постели сборочно-сварочного станда усилием не менее 150—200 Н на каждые 10 мм длины шва. С увеличением толщины соединяемых элементов усилие прижима увеличивается. При сварке алюминиевых конструкций используют секционные прижимы с длиной рабочей части не более 250 мм, располагая их на минимально возможном расстоянии от оси шва. Это расстояние определяют размеры нижней части сварочной горелки.

В собранных стыковых соединениях смещение кромок допускается 0,5 мм для листов толщиной до 5 мм, 1 мм для листов толщиной 6—10 мм и 10% толщины для листов толщиной более 12 мм, но не более 2 мм при

сварке неплавящимся электродом и 3 мм при сварке плавящимся электродом.

В случае сварки опытных конструкций без оснастки соединяемые элементы собирают прихватками. Размеры, расположение прихваток выбирают из условий жесткости и прочности деталей в собранном виде (табл. 5).

Таблица 5

Размеры прихваток для стыковых соединений, мм

Толщина металла	Длина прихваток	Расстояние между прихватками	Толщина металла	Длина прихваток	Расстояние между прихватками
3	10—15	100—150	10	20—25	300—350
4	10—15	100—150	20	50—70	300—400
6	15—20	100—300	30	60—80	300—400
8	15—25	250—300	40	70—90	300—400

Прихватки устанавливают, начиная от середины соединения и двигаясь к его краям, поочередно с каждой стороны. В стыковых соединениях под автоматическую сварку плавящимся или неплавящимся электродом прихватку можно выполнять автоматами. В случае нахлесточных соединений прихватку выполняют неплавящимся электродом без подачи присадочного металла за счет оплавления кромок.

Угловые, нахлесточные и тавровые соединения деталей толщиной свыше 10 мм рекомендуется прихватывать полуавтоматической сваркой. Измененную прихватками форму соединяемых кромок восстанавливают, удаляя излишний металл прихваток механическим путем. Собранные на прихватках соединения сохраняют склонность к потере устойчивости. При ручной и полуавтоматической сварке на деформацию соединения существенно влияет порядок выполнения швов. Целесообразно использовать обратно-ступенчатые швы, т. е. первый участок шва выполнять, отступив от передней кромки приблизительно на 1/3 длины соединения, а пропущенную часть соединения сваривать в последнюю очередь от шва к передней кромке. Сварку конструкций, имеющих несколько последовательно расположенных швов, целесообразно начинать со среднего шва, а затем по-

чередно, с каждой стороны, выполнять остальные швы, двигаясь к краю конструкции.

Остаточные сварочные деформации, величина которых превышает допустимые пределы, в тех случаях, когда это допустимо по техническим условиям, уменьшают ударной и тепловой правкой. Чтобы не повредить поверхность, алюминиевые соединения правят ударами резиновых или деревянных молотков. Правку стальными молотками можно выполнять только через алюминиевые или деревянные подкладки. Тепловую правку применяют для тех алюминиевых соединений, работоспособность которых не ухудшается сопровождающим нагрев разупрочнением, например при правке малонагруженных элементов или конструкций из отожженного металла. Максимальная температура подогрева должна быть не выше температуры отжига для применяемого алюминиевого сплава. Весьма эффективно совместное применение тепловой и ударной правки. В процессе правки алюминиевых конструкций следует учитывать повышенную концентрацию ударных деформаций в зоне сплавления и следить за тем, чтобы накопленная на этих участках деформация не превысила их запас пластичности.

Особенности конструирования технологичных и прочных сварных соединений. Повышенная склонность к деформации свариваемых соединений алюминия и его сплавов способствует появлению в них горячих трещин. Особенно склонны к образованию горячих трещин стыковые швы, соединяющие узкие элементы и близко расположенные швы, у которых зона термического влияния достигает соседнего шва. Такие условия создаются и при сварке круговых швов малого диаметра (рис. 5, а). Чтобы предотвратить образование горячих трещин, соседние швы располагают на максимально возможном уда-

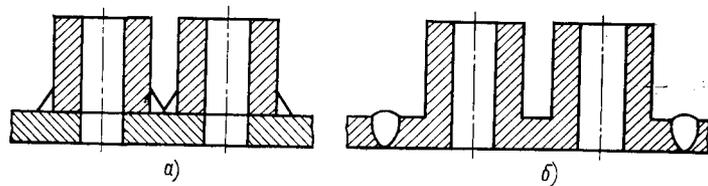


Рис. 5. Конструкция соединения близко расположенных патрубков с листом:

а — нерекомендуемая; б — рекомендуемая

лении друг от друга. В тех случаях, когда нельзя разнести швы или увеличить диаметр кругового шва из-за особенностей конструкции, соединяемые элементы изготавливают как единое целое (рис. 5, б). При сварке различных патрубков с тонкостенными оболочками следует учитывать текстуру используемых для их изготовления заготовок. Структура деформированных алюминиевых полуфабрикатов состоит из вытянутых зерен, по границам которых сосредоточены выделения легкоплавких эвтектик. Если протяженность этих выделений больше толщины соединяемых элементов, необходимо ориентировать их так, чтобы вытянутые границы зерен были перпендикулярны к соединяемой кромке патрубка. Такое направление обеспечивают штучера, изготовленные штамповкой и направленной ковкой. Когда это условие не выполняется, например в случае изготовления штучеров из прессованных прутков, по расплавленным в околошовной зоне эвтектическим структурным составляющим могут образоваться сквозные горячие трещины.

Алюминиевые сплавы обычно используют в виде деформированных и термообработанных полуфабрикатов, прочность которых выше прочности полученного при их сварке литого металла шва или отожженного основного металла в зоне термического влияния. Минимальная прочность этих участков определяет прочность всего сварного соединения. Таким образом, чем выше прочность сварных соединений, тем эффективнее используется в конструкции исходное упрочненное состояние алюминиевых полуфабрикатов. Для увеличения прочности соединений алюминиевые сплавы сваривают на режимах с малой погонной энергией, а после сварки соединения упрочняют механической, взрывной или термической обработкой. Достигнутый при этом уровень прочности сварных соединений остается ниже максимальной прочности, которую можно получить при обработке исходного металла. Кроме того, значительное механическое упрочнение литого металла шва и зоны сплавления часто ограничено их низкой пластичностью, а полный цикл термообработки не всегда возможен из-за значительных размеров сваренного изделия или его чрезмерной деформации при закалке.

В этих случаях равнопрочные соединения получают, увеличивая рабочее сечение металла шва и зоны терми-

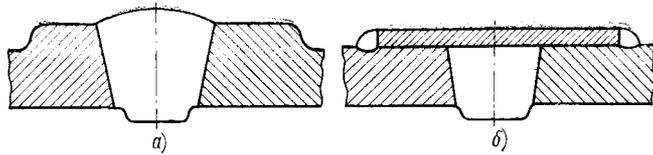


Рис. 6. Конструкция стыкового соединения повышенной прочности: *а* — с увеличенным сечением сваренных кромок; *б* — с дополнительной накладкой

ческого влияния. Для этого после сварки утоняют основной металл за пределами зоны термического влияния или же сваривают прессованные полуфабрикаты, которые имеют утолщенные соединяемые кромки (рис. 6, *а*). Разницу в толщине основного металла возле шва и за пределами зоны термического влияния рассчитывают по отношению прочностных характеристик свариваемого металла и сварного соединения. Повышенную, но меньшую, чем у исходного основного металла прочность, имеют соединения с накладками (рис. 6, *б*), которые перекрывают зону термического влияния и приварены к соединенным элементам с минимальным проплавом. Таким образом, конструкции сварных соединений должны способствовать их получению без трещин и внутренних окисных пленок, с заданным уровнем остаточных деформаций, прочности и других эксплуатационных характеристик.

Требуемые свойства соединений достигаются с помощью различных технологических мероприятий, которые выбирает конструктор, совместно с технологом, указывая их на чертеже вместе с типом соединения, разделкой кромок и размерами шва. Стоимость технологических операций, оснастки и оборудования, которые обеспечивают соединению требуемую работоспособность, характеризует его технологичность. Чем меньше затраты на получение работоспособных соединений, тем выше их технологичность. В зависимости от назначения изделия требования к работоспособности меняются, поэтому технологичность является относительной характеристикой и служит лишь для сравнительной оценки затрат на получение соединений с одинаковой работоспособностью. В этой связи задача создания более технологичных соединений должна решаться без ухудшения работоспособности соединений и изделия в целом.

МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ СВАРКИ АЛЮМИНИЯ И ЕГО СПЛАВОВ

Сварочная проволока. При дуговой сварке большинства соединений требуется проволока, металл которой заполняет зазоры, а также обеспечивает формирование шва в соответствии с размерами, установленными ГОСТ 14806—80. Кроме того, проволока позволяет изменять состав шва, что особенно важно при сварке алюминиевых сплавов, у которых при одинаковом химическом составе прочностные, коррозионные и многие другие свойства литого шва хуже, чем у соединяемых листов, пресс-профилей и других полуфабрикатов, подвергнутых термической или механической обработке. Применение упрочняющей обработки для литого металла шва и зоны сплавления не всегда возможно из-за формы и размеров сваренных изделий, поэтому свойства этих участков соединения обычно улучшают, изменяя их химический и фазовый состав с помощью проволоки. Требуемый для легирования состав проволоки выбирают с учетом химического состава свариваемых кромок и доли участия проволоки в образовании шва. Для дуговой сварки в инертных газах содержание каждого элемента в проволоке можно рассчитать из уравнения

$$C_{\text{п}} = \frac{C_{\text{ш}}}{\gamma_{\text{п}} k_{\text{у}}} - \frac{C_0}{\gamma_{\text{п}}} + C_0,$$

где $C_{\text{п}}$ — расчетное содержание элемента в проволоке; C_0 — содержание элемента в свариваемом металле; $C_{\text{ш}}$ — содержание элемента в металле шва; $k_{\text{у}}$ — суммарный коэффициент усвоения элемента металлом шва при сварке; $\gamma_{\text{п}}$ — доля проволоки в металле шва.

Доля проволоки в металле шва зависит от типа соединения, толщины свариваемых кромок, формы и размеров шва, зазоров и превышений. Согласно размерам шва, приведенным в ГОСТ 14806—80, доля проволоки в стыковых соединениях без разделки кромок уменьшается с увеличением толщины кромок, а при сварке стыковых соединений с разделкой кромок для металла большей толщины требуется большее количество проволоки. В угловых и тавровых соединениях доля проволоки увеличивается по мере увеличения катетов шва. При отсутствии зазоров и превышений количество про-

волоки в металле шва можно определить по размерам поперечного сечения шва.

Под действием высоких температур часть легирующих элементов улетучивается с поверхности расплавленного металла сварочной ванны и электродной проволоки. Эти потери учитывает суммарный коэффициент усвоения элемента металлом шва, который устанавливает, какое количество данного элемента перешло в шов. Величина потерь зависит от способа и режима сварки, физико-химических свойств элемента и его содержания в проволоке. Обычно коэффициент усвоения k_y определяют экспериментальным путем, сравнивая фактическое содержание элемента в шве с расчетным.

Определенный по уравнению состав проволоки чаще всего не совпадает с составом проволок, выпускаемых промышленностью. В связи с этим для сварки подбирают ту марку проволоки, у которой состав наиболее соответствует расчетному, а имеющиеся между ними различия по содержанию основного легирующего элемента устраняют за счет изменения разделки кромок и формы шва. Так как введение остальных элементов проволоки в шов определяется той же разделкой и формой шва, то требуемое содержание элементов в металле шва достигается только в случае применения для каждого из сплавов специальных проволок, состав которых наиболее полно учитывает особенности сварки и эксплуатации их соединений. В связи с этим расчетный состав проволок определяют только при исследованиях свариваемости новых сплавов и изысканиях состава проволок.

Влияние состава литого металла шва и зоны сплавления на свойства сварных соединений алюминиевых сплавов неодинаково.

С введением легирующих элементов прочность литого металла повышается, а пластичность и коррозионная стойкость снижаются. Для большинства алюминиевых сплавов суммарное содержание в шве или зоне сплавления 5—8% легирующих элементов достаточно, чтобы по границам зерен образовался сплошной ободок из вторичных фаз. При такой структуре дальнейшее легирование не только не увеличивает, а даже несколько снижает прочность в результате концентрации напряжений по малопластичным вторичным фазам. Таким образом, для получения пластичных коррозионно-стойких соединений алюминиевые сплавы целесообразно

сваривать менее легированными проволоками. Когда требуются сварные соединения повышенной прочности, наоборот, применяют более легированные проволоки с суммарным содержанием легирующих элементов не выше 6—7%.

Наличие максимума трещинообразования при сварке алюминиевых сплавов в каждой системе легирования определяет выбор проволоки, способной обеспечить соединениям повышенную стойкость против трещин. Чтобы повысить стойкость соединений против горячих трещин при сварке сплавов менее легированных, чем сплав с максимальным показателем трещинообразования, применяют проволоки с пониженным содержанием легирующих элементов, тогда как более легированные сплавы сваривают проволоками с более высоким содержанием легирующих элементов.

Существующие между составом и свойствами металла шва зависимости не позволяют получать соединения, которые одновременно имели бы максимальные значения всех технологических и эксплуатационных характеристик. Поэтому в зависимости от предъявляемых к соединениям требований для сварки каждого из алюминиевых сплавов обычно применяют несколько марок проволок. Одна из этих проволок — универсальная — обеспечивает соединениям достаточно высокие значения всех основных характеристик: стойкость против горячих трещин, прочность, пластичность и коррозионную стойкость. Остальные рекомендованные проволоки обеспечивают соединениям повышенные значения одной из названных характеристик при удовлетворительных значениях всех остальных (табл. 6). Рекомендованные в табл. 6 марки проволок выбраны с учетом того, что при сварке доля их металла в металле шва составляет 30—40%. При сварке соединений с другим соотношением металла проволоки и шва необходимое содержание легирующих элементов в шве получают, соответственно изменяя форму и размеры соединяемых кромок.

Сварку литейных сплавов (см. табл. 2) выполняют при заварке дефектов литья в сложных отливках, повторное изготовление которых связано с большими трудозатратами. Наличие в литейных сплавах повышенных количеств кремния, меди, магния вызывает необходимость сварки их высоколегированными проволоками. Для сварки сплавов АЛ2, АЛ4, АЛ30 с высоким содер-

Проволока¹ для сварки алюминия и его сплавов

Таблица 6

Свариваемый металл	Универсальная проволока, обеспечивающая удовлетворительные характеристики соединения	Проволока, обеспечивающая удовлетворительные основные характеристики соединения и повышенные ² показатели				коррозионной стойкости ³
		стойкости против горячих трещин	временного сопротивления разрыву	относительного удлинения		
A99, A97, A95	A99	A99	СвА85Т	A99	A99	A99
A85, A8, АД00	СвА85Т	СвА85Т	1437	СвА97	СвА97	1437
АД0, АД1	СвА5	СвА5	СвА5	СвА97	СвА97	СвА85Т
АМЦС	СвАМц	СвАМц	СвАМц	СвАМц	СвАМц	СвАМц
АМг3	СвАМг3	СвАМг5	СвАМг5	СвАМг5	СвАМг5	СвАМг5
АМг5	СвАМг5	СвАМг6	СвАМг6	СвАМг6	СвАМг6	Св1557
АМг6	СвАМг6	СвАМг63	СвАМг63	СвАМг63	СвАМг63	Св1557
АМг61	СвАМг61	СвАМг63	СвАМг63	СвАМг63	СвАМг63	СвАМг5
АВ, АД31, АД33	СвАК5	СвАК5	Св1557	Св1557	Св1557	АВч
1915	Св1557	СвАМг5	СвАМг5	СвАМг5	СвАМг5	Св1557
1201	Св1201	Св1201	Св1201	Св1201	Св1201	Св1201

¹ Проволоку с обозначением «Св» поставляют по ГОСТ 7871—75, остальную — по ТУ [4].

² Повышенные значения одной из основных характеристик соединения отличаются от аналогичных показателей при сварке универсальной проволокой в среднем на 5—10%. При этом остальные основные характеристики могут снизиться примерно в такой же степени.

³ Проволока марок А99, 1437 и СвА85Т обеспечивает повышенную коррозионную стойкость соединений алюминия в азотной кислоте, а проволока марок, рекомендуемых для других деформируемых сплавов, гарантирует повышенную стойкость шва в атмосферных условиях.

Проволока для сварки разноименных алюминиевых сплавов

Свариваемые сплавы	1201	1915	АД33	АД31	АВ
A99	СвАК5	СвАК5	СвАК5	СвАК5	СвАК5
АД00	СвАК5	СвАК5	СвАК5	СвАК5	СвАК5
АД0	СвАК5	СвАК5	СвАК5	СвАК5	СвАК5
АМЦС	Св1201	СвАМг5	СвАК5	СвАК5	ЗвАК5
АМг3	СвАК5	СвАМг5	СвАМг5	СвАМг5	СвАМг5
АМг5	СвАК5	СвАМг5	СвАМг6	СвАМг6	СвАМг6
АМг6	СвАК5	СвАМг6	СвАМг6	СвАМг6	СвАМг6
АВ	СвАК5	СвАМг6	СвАК5	СвАК5	
АД31	СвАК5	СвАМг6	СвАК5		
АД33	СвАК5	СвАМг6			
1915	СвАК5	СвАМг6			

Таблица 7

жанием кремния обычно используют проволоку СвАК10, а для менее легированных сплавов АЛ9 и АЛ10В — проволоку СвАК5. Литейные алюминиевомагниевого сплавы АЛ29, АЛ27 и АЛ18 сваривают проволокой СвАМг6. Литейные сплавы АЛ19 и АЛ24, близкие по составу к деформируемым сплавам 1201 и 1915, сваривают проволоками Св1201 и Св1557 соответственно.

В современных сварных конструкциях нередко применяют различные по составу алюминиевые сплавы. В одних случаях это обусловлено технологическими особенностями получения используемых полуфабрикатов: листов, профилей, поковок, штампованных заготовок и проволоки. В других — решающую роль при выборе сплава играют условия работы соединяемых элементов, которые определяют требования к их прочности и жаропрочности, пластичности и коррозионной стойкости, теплопроводности, электропроводности, сопротивлению изнашиванию и др. эксплуатационным свойствам. Характерное для соединений разноименных алюминиевых сплавов существенное различие в составе металла шва, зон сплавления и термического влияния затрудняет улучшение их свойств. В результате механические, коррозионные и другие свойства соединений разноименных сплавов имеют более низкие значения, чем те же показатели соединений одноименных сплавов. Кроме того, полученный при сварке двух различных сплавов состав металла шва, как правило, обладает повышенной склон-

Свариваемые сплавы	АМг6	АМг5	АМг3	АМцС	АД0	АД00
А99 АД00 АД0 АМцС АМг3 АМг5 АМг6 АВ АД31 АД33 1915	СвАМг6 СвАМг6 СвАМг6 СвАМг6 СвАМг6 СвАМг6	СвАМг5 СвАМг5 СвАМг5 СвАМг5	СвАМг5 СвАМг5 СвАМг5	СвАМц СвАМц СвАМц	СвА5 СвА5	СвА85Т

ностью к образованию горячих трещин. В связи с этим для сварки разноименных алюминиевых сплавов выбирают проволоки, состав которых обеспечивает соединениям прежде всего повышенную стойкость против образования горячих трещин (табл. 7). При этом эффективность предотвращения трещин растет по мере увеличения относительного содержания в шве металла рекомендованных марок проволок.

В тех случаях, когда применение проволоки не обеспечивает полного отсутствия трещин, дополнительно используют конструктивные и технологические методы их предупреждения или же применяют менее склонный к трещинам основной металл. Химический состав рекомендуемых для сварки алюминия и его сплавов проволок приведен в табл. 8.

Защитные (инертные) газы. Для защиты расплавленного металла сварочной ванны и проволоки при сварке алюминия и его сплавов применяют инертные газы и их смеси: аргон высшего или первого сорта по ГОСТ 10157—79 и гелий особой или высокой чистоты (табл. 9 и 10). Инертные газы аргон и гелий поставляют в баллонах. При давлении 15 МПа в каждом баллоне содержится ~ 6 м³ инертного газа.

Вольфрамовые электроды. По ГОСТ 23949—80 электроды в виде прутков или проволоки изготавливают следующих диаметров: 0,5 (только ЭВЧ); 1,0; 1,6; 2,5 (только ЭВЧ и ЭВЛ); 2,0; 3,0; 4,0; 5,0; 6,0; 8,0 и

Таблица 8

Состав проволок, рекомендуемых для сварки алюминия и его сплавов, %

Проволока	Основные компоненты										
	Al	Mg	Mn	Fe	Si	Ti	Be	Zr			
А99	≥ 99,99	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Св97	≥ 99,97	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
СвА85Т	≥ 99,85	—	—	0,2—0,35	—	0,2—0,5	—	—	—	—	—
СвА5	≥ 99,5	—	—	—	0,1—0,25	—	—	—	—	—	—
1437	≥ 97,3	—	—	—	—	0,6—1 Cr	—	—	—	—	—
АВч	Остальное	0,6—1	—	—	0,35—0,55	—	—	—	—	—	0,5—0,9
СвАМц	»	—	1,0—1,5	0,3—0,5	0,2—0,4	—	—	—	—	—	—
СвАМг3	»	3,2—3,8	0,3—0,6	—	0,5—0,8	—	—	—	—	—	—
СвАМг5	»	4,8—5,8	0,5—0,8	—	—	—	—	—	—	—	—
СвАМг6	»	5,8—6,8	0,5—0,8	—	—	0,1—0,2	0,002—0,005	—	—	—	—
Св1557	»	4,5—5,5	0,2—0,6	—	—	0,1—0,2	0,002—0,005	—	—	—	—
СвАМг63	»	5,8—6,8	0,5—0,8	—	—	0,15Cr	0,001—0,005	—	—	—	0,2—0,35
СвАМг61	»	5,5—6,5	0,8—1,1	—	—	—	0,002—0,005	—	—	—	0,15—0,35
СвАК5	»	—	—	—	—	—	0,0001—0,0003	—	—	—	0,002—0,12
СвАК10	»	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
Св1201	»	6—6,8 Cu	0,2—0,4	—	0,05—0,15Va	0,1—0,2	0,0001—0,0008	—	—	—	0,1—0,25

Проволока	Примеси, не более					Прочие примеси	Сумма примесей
	Fe	Si	Zn	Cu	Mg		
A99	0,003	0,003	0,003	0,003	0,002 Ti	0,001	0,01
СВ97	0,015	0,015	—	0,005	—	0,01	0,03
СВА85Т	0,04	0,04	0,02	0,01	0,01	—	0,08
СВА5	—	—	—	0,015	—	0,05	0,5
I437	0,3	0,2	—	0,015	—	—	0,8
АВч	0,12	—	0,05	0,05	0,05 Мп	0,1	—
СВАМц	—	—	0,1	0,2	0,05	0,1	0,35
СВАМг3	0,5	—	0,2	0,05	—	0,1	0,85
СВАМг5	0,4	0,4	0,2	0,05	—	0,1	1,4
СВАМг6	0,4	0,4	0,2	0,1	—	0,1	1,2
СВ1557	0,3	0,15	—	0,05	—	0,1	0,6
СВАМг63	0,05	0,05	0,05	0,05	—	0,001	0,15
СВАМг61	0,4	0,4	0,2	0,05	—	0,1	1,15
СВАК5	0,6	—	0,1 Zn и Sn	0,2	—	0,1	1,0
СВАК10	0,6	—	0,2	0,1	0,10	0,1	1,1
СВ1201	0,15	0,08	0,5	—	0,02	0,1	0,3

Примечания. 1. Для проволоки всех марок, кроме СВАМг3, СВАК5 и СВАК10, соотношение содержания железа и кремния должно быть более единицы.

2. Содержание бериллия устанавливается по расчету шихты.

3. Для проволоки марок СВАМг3, СВАК10 допускается содержание остаточного титана до 0,15%.

4. По заказу потребителя проволоку из сплава марки СВАМг6 изготавливают с содержанием водорода не более 0,4 см³ в 100 г металла.

5. В графу «Прочие примеси» включены примеси, пределы содержания которых не указаны в таблице. Содержание прочих примесей не определяется, а гарантируется предприятием-изготовителем.

6. По заказу потребителя содержание железа в сплаве СВАК5 может быть не более 0,3%.

7. Проволоку СВАК10 изготавливают прессованной диаметром 4,5 мм и более.

Таблица 9

Состав газообразного аргона

Сорт аргона	Содержание, об. %			Влага, г/м ³
	Аргон	Азот	Кислород	
Высший	≤ 99,99	≤ 0,006	≤ 0,0007	≤ 0,007
Первый	≤ 99,98	≤ 0,01	≤ 0,003	≤ 0,03

Таблица 10

Состав газообразного гелия

Гелий чистоты	Содержание, об. %				
	Гелий	Водород	Азот	Кислород	Углерод
Особой	≥ 99,995	≤ 0,0001	≤ 0,0005	—	≤ 0,0001
Высокой	≥ 99,985	≤ 0,0025	≤ 0,005	≤ 0,002	≤ 0,003

Гелий чистоты	Содержание, об. %			
	CO + CO ₂	Неон	Аргон	Водяные пары
Особой	≤ 0,0002	≤ 0,004	—	≤ 0,0005
Высокой	≤ 0,001	≤ 0,009	≤ 0,001	≤ 0,002

10,0 мм. Длина электродов в зависимости от диаметра 75, 150, 200 и 300 мм.

Присадки окислов редкоземельных металлов резко снижают количество теплоты, выделяющейся на электродах. В результате стойкость вольфрамовых электродов при сварке на переменном и постоянном токе повышается.

Электрод	Присадка к вольфраму
ЭВЧ	—
ЭВЛ	1,1—1,4% окиси лантана
ЭВИ-1	1,5—2,3% окиси иттрия
ЭВИ-2	2—3% окиси иттрия
ЭВИ-3	2,5—3,5% окиси иттрия
ЭВТ-15	1,5—2% двуокиси тория

Покрытые электроды. Для ручной дуговой сварки применяют покрытые электроды ОЗА1 и ОЗА2. Электроды ОЗА1 имеют стержень из проволоки СвА5, их используют при сварке алюминия. В качестве стержня электродов ОЗА2 используют проволоку СвАК5, их применяют при сварке сплавов. Некоторые заводы изготавливают электроды марки АФ-4аКр. Состав покрытия электродов: 65% флюса АФ-4а (для газовой сварки алюминия); 35% криолита (Na_3AlF_6). В электродах для сварки алюминия технической чистоты, сплава АМц и силумина используют стержни из проволоки соответственно СвА5, СвАМц и СвАК5 или СвАК10. Компоненты покрытия (каждый в отдельности) измельчают до состояния пудры, взвешивают в соответствии с рецептом и замешивают на растворе декстрина или насыщенном растворе хлористого натрия в воде, перетирая до пастообразного состояния. Покрытие наносят окунанием стержня в пастообразный раствор один или два раза. После каждого окунания электроды провяливают на воздухе в вертикальном положении в течение суток при комнатной температуре, а затем прокаливают в сушильном шкафу при температуре 200°C в течение 2 ч. Температуру в сушильном шкафу повышают постепенно. С течением времени при хранении электроды увлажняются, поэтому перед сваркой их необходимо подсушить при температуре 150—200°C.

Толщину флюсового покрытия выбирают в зависимости от диаметра электрода:

Диаметр электродного стержня, мм	4	5	6	8
Толщина покрытия, мм	1—1,1	1,1—1,2	1,2—1,4	1,4—1,5

Перед нанесением покрытия проволоку обезжиривают и удаляют с ее поверхности окисную пленку.

Сварочные флюсы. Для автоматической сварки по флюсу применяют флюс АН-А1 следующего состава: 50% калия хлористого (KCl); 20% натрия хлористого (NaCl); 30% криолита (Na_3AlF_6). Флюс изготавливают путем механического перемешивания или плавления компонентов. Плавленый флюс обеспечивает меньшую склонность к пористости швов.

При изготовлении неплавленого флюса компоненты высушивают при температуре 300—400°C, измельчают и просеивают через сито размером 900 отв/см².

Просеянные материалы взвешивают в соответствии с процентным составом и перемешивают.

Для приготовления плавленого флюса исходные компоненты просушивают при температуре 200—250°C, просеивают через сито размером 16 отв/см² и взвешивают в соответствии с процентным составом. После перемешивания шихты флюс плавят в графитовых тиглях при температуре 750—800°C. Расплав выдерживают в печи в течение 10 мин, а затем выливают на противень из коррозионно-стойкой стали. Остывший флюс дробят и просеивают через сито размером 100 отв/см², затем просушивают при температуре 200—250°C в течение 2 ч.

Независимо от способа получения флюс должен храниться в герметически закрываемой стеклянной или железной таре, а перед употреблением просушиваться при температуре 200—250°C в течение 2 ч.

ДУГОВАЯ СВАРКА АЛЮМИНИЯ И ЕГО СПЛАВОВ

Для сварки алюминия и его сплавов применяют почти все известные способы дуговой сварки плавлением: с использованием флюсов — штучными покрытыми электродами, угольной дугой, автоматической полуоткрытой дугой (по флюсу); в инертных газах неплавящимся (вольфрамовым) или плавящимся электродом.

В настоящее время наиболее широко применяют сварку в инертных газах.

Алюминий высокой и технической чистоты и сплав АМц сваривают всеми способами дуговой сварки. Деформируемые сплавы систем Al—Mg, Al—Zn—Mg, Al—Cu—Mn, как правило, сваривают в инертной атмосфере.

Способы сварки алюминия с использованием флюса, в особенности ручные — угольным электродом, штучным покрытым электродом, — применяют с каждым годом все меньше, так как сварные соединения имеют низкие коррозионные свойства, особенно в контакте с агрессивными средами, и менее стабильные механические свойства, чем при сварке с использованием инертных газов. В большинстве случаев требуется трудоем-

кая очистка поверхности швов от шлака и остатков флюса.

Сварка угольным электродом (табл. 11). Этот один из первых способов сварки алюминия в настоящее время используют сравнительно редко (сварка шинопроводов, мало ответственной емкостной аппаратуры из алюминия технической чистоты).

Таблица 11

Режимы сварки алюминия угольными (графитовыми) электродами стыковых соединений

Толщина металла, мм	Длина дуги, мм	Сварочный ток, А	Диаметр электрода, мм		Диаметр присадочного прутка, мм	Зазор, мм
			угольного	графитового		
2—5	7—10	150—250	12	10	4—6	1,5—3
5—10	14—20	250—400	15	12	6—8	3,0—8
10—15	20—22	400—500	18	15	8—10	8,0—12

Угольные электроды марки СЖ выпускают по ГОСТ 10720—75 в виде круглых стержней длиной до 700 мм и диаметром 6, 8, 10, 15 и 18 мм. Стандарта на графитовые электроды, специально предназначенные для дуговой сварки, нет. Поэтому их изготавливают путем резки и обтачивания графитизированных электродов по ГОСТ 4426—80.

Графитовые электроды более стойкие, чем угольные. Плотность тока при сварке угольным электродом достигает 100—200 А/см², а при сварке графитовым электродом 200—500 А/см². Расход графитовых электродов меньше, чем угольных. Перед употреблением конец электрода затачивают на конус под углом 60—70°.

При сварке угольным электродом требуется постоянный ток прямой полярности. Применяют сварочные генераторы или выпрямители с падающей внешней характеристикой. Чтобы избежать блуждания дуги по кромкам угольного электрода, ее стабилизируют продольным магнитным полем соленоида, состоящего из 6—10 витков провода или медной трубки. Соленоид включается последовательно с дугой. Соленоид из трубки служит одновременно охлаждающим устройством электрододержателя. Электрододержатель должен обеспечивать надежный контакт с электродом. Графитовый

электрод располагают по отношению к изделию под углом 70—80°. Угол между графитовым электродом и присадочным прутком обычно составляет 70—80°.

В качестве присадочного прутка используют электроды, применяемые для ручной дуговой сварки. При сварке металла больших толщин применяют «правый» способ. Угольным электродом могут быть выполнены не только стыковые, но и торцовые соединения. Одностороннюю сварку стыковых соединений выполняют на стальной подкладке с канавкой. Для коротких швов большого сечения (шины) используют графитовые подкладки, а также графитовые формовочные пластины, прикладываемые к боковым поверхностям деталей. Эти пластины позволяют хорошо прогреть соединяемые кромки и предотвращают вытекание расплавленного металла сварочной ванны.

Стыковые соединения рационально сваривать за один проход. Разделку кромок обычно не производят, при необходимости соединяемые кромки собирают с зазором, величина которого зависит от толщины металла. Остатки флюса, а также шлак после сварки необходимо удалять во избежание коррозии металла.

Сварка металлическим покрытым электродом. Ручную дуговую сварку алюминия применяют при изготовлении конструкций из алюминия технической чистоты, сплава АМц, силуминов. Толщина свариваемого металла лимитируется диаметром электрода.

Минимальный диаметр электрода обычно составляет 4 мм, что вызвано трудностями сварки электродами малого сечения вследствие высокой скорости их плавления. В связи с этим толщина свариваемого металла должна быть свыше 4 мм, а угловые швы должны иметь катеты не менее 6×6 мм. Данный способ рекомендуется для сварки стыковых соединений в нижнем положении. Сварка тавровых и нахлесточных соединений также возможна, но при этом следует учитывать необходимость удаления остатков шлака. Сварка на вертикальной плоскости трудноосуществима, а сварку в потолочном положении не применяют из-за невозможности удержания металла сварочной ванны.

Сварку алюминия покрытыми электродами выполняют постоянным током обратной полярности. В качестве источников питания применяют сварочные генераторы или выпрямители с падающей внешней характерис-

тикой. Дугу поддерживают более короткой. Наклон электрода составляет 90—60°. Сварка наклонным электродом позволяет легче следить за ванной расплавленного металла. Перед сваркой стыковых и угловых швов кромки листов подогревают газовым пламенем. Температуру подогрева выбирают в зависимости от толщины свариваемых деталей:

Толщина металла, мм	6—8	8—10	>10
Температура подогрева, °С . . .	100—150	150—250	250—350

Литые детали рекомендуется подогревать до температуры 150—200°С.

При сварке металла толщиной до 20 мм разделка кромок обычно не требуется. Проплав обеспечивает зазор между кромками свариваемых деталей, который должен быть не более 0,5—1 мм. Сварка стыковых соединений обычно двусторонняя. При толщине листов до 14 мм обратный шов заваривают без предварительной вырубки корня шва. Обратный шов листов большей толщины заваривают после контрольной вырубки корня первого шва до уровня чистого наплавленного металла.

Ручная дуговая сварка алюминия покрытыми электродами рекомендуется только в нижнем положении и, как правило, без колебаний конца электрода. Угловые швы тавровых соединений сваривают на тех же режимах, что и стыковые соединения (табл. 12). При многослойной сварке корневые швы выполняют электродами мень-

Таблица 12

Режимы и затраты материалов при ручной дуговой сварке алюминия

Толщина металла, мм	Электроды		Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Ширина шва, мм
	Диаметр, мм	Расход, г/м шва			
4	4	150	180—200	26—30	8
6	5	200	280—300	28—32	10
8	6	270	300—320	30—34	14
10	6	320	320—380	30—34	16
12	6—8	400	360—420	30—34	20
14	6—8	640	380—440	32—36	22
16	8	960	400—480	32—36	24
18	8	1270	420—520	32—36	26
20	8	1620	480—550	32—36	28

шего диаметра. После сварки с поверхности шва удаляют шлак. Брызги электродного металла и лишнее усиление шва удаляют скребком, пневматической фрезой или зубилом.

Автоматическая сварка по флюсу. От известного способа сварки стали под флюсом данный способ отличается наличием тонкого слоя флюса впереди дуги.

Флюс из бункера (или вручную) через дозатор насыпают тонким слоем впереди дуги. Потом он попадает в зону горения дуги, где под воздействием теплоты, выделяющейся в дуге, расплавляется. При этом выделяются пары и газы, которые защищают жидкий металл от окисления. Флюс также способствует удалению окисной пленки с поверхности металла. Данный способ применяют для сварки стыковых соединений металла (технический алюминий, сплав АМц) толщиной 10—25 мм без разделки кромок. Сварку по флюсу выполняют, как правило, двусторонними швами.

Требования к сборке и точности поджатия подкладок существенно снижаются при переходе от одинарного к двойному—расщепленному электроду. Электроды располагают параллельно относительно плоскости стыка. Сварочный ток подводится к обеим проволокам, а горящие на концах проволок дуги образуют общий факел. Суммарная мощность при сварке расщепленным электродом незначительно больше мощности одной дуги при сварке одинарным электродом. Однако распределение энергии по сечению шва получается более благоприятным и опасность прожогов металла резко снижается. Использование параллельно расположенных электродов дает возможность выполнить сварку второго шва на весу, а первого на флюсовой подушке. Наряду с применением прямых проволок при изготовлении сварных изделий из алюминия толщиной 20—32 мм получил распространение вариант сварки по флюсу так называемыми зигзагообразными расщепленными электродами. Проволоку изгибают в процессе сварки шестеренками, расположенными на подающем механизме. В результате плавления зигзагообразных электродов происходит колебание дуги с заданной частотой. Вследствие этого уменьшается ширина шва, лучше удаляются газы и уменьшается расход электроэнергии.

Для сварки используют постоянный ток обратной полярности. Применяют сварочные генераторы или вы-

прямители с падающей внешней характеристикой. После сварки необходимо удалить остатки флюса и шлак с поверхности швов.

Для автоматической сварки алюминия по флюсу используют аппараты на базе автоматов, предназначенных для сварки сталей под флюсом (АВС, АБСК) и специальные тракторы ТС33 и ТС36. Новые аппараты и тракторы отличаются наличием бункера с дозаторами флюса, подающего механизма тянущего типа, мундштука, который обеспечивает больший вылет электрода по сравнению с мундштуком, применяемым для сварки сталей, газоотсасывающего устройства. Помимо этого в аппаратах предусмотрена повышенная скорость подачи проволоки и более низкая, чем для стали, скорость сварки (табл. 13, 14).

Таблица 13

**Режимы автоматической сварки алюминия по флюсу АН-А1
одинарным электродом**

Толщина металла, мм	Диаметр электрода, мм	Скорость подачи электрода, м/ч	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч	Слой флюса, мм	
						Ширина	Высота
10	1,6	410—425	220—250	30—34	20—22	26	10
12	1,8	338—364	260—280	34—36	18—19	28	12
14	2,0	290—313	310—350	36—38	17—18	30	12
16	2,5	250—270	350—370	37—40	16—17	32	12
18	2,8	232—240	400—450	38—41	15—16	42	12
20	3,15	220—225	450—470	39—41	14—15	44	14

Таблица 14

**Режимы автоматической сварки алюминия по флюсу АН-А1
расщепленным электродом**

Толщина металла, мм	Диаметр электрода, мм	Расстояние между осями электродов, мм	Суммарный сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч	Слой флюса, мм	
						Ширина	Высота
12	1,6	7—9	320—340	34—36	17—18	30	11
16	2,0	8—10	400—450	38—40	15—16	42	12
20	2,5	10—12	460—500	38—40	12—14	46	16
25	2,5	12—14	650—700	44—46	12—14	50	18

Дуговая сварка в среде защитных газов. Для дуговой сварки неплавящимся электродом наиболее часто применяют электроды из лантанированного и иттрированного вольфрама (табл. 15, 16). Использование электродов

Таблица 15

Допустимые значения переменного тока для электродов различных марок (постоянная составляющая 0—10%)

Диаметр электрода, мм	Максимальный сварочный ток (А) для вольфрамовых электродов			
	ЭВЧ	ЭВЛ	ЭВТ-15	ЭВИ-3
1,0	—	65—75	65—75	70—80
1,6	—	80—100	80—100	100—150
2,0	—	150—180	150—180	200—250
4,0	180—190	200—220	200—220	300—350
6,0	240—260	300—340	300—340	410—480
8,0	360—390	450—500	440—500	490—590
10,0	450—500	600—650	620—660	650—750

родов из торированного вольфрама ЭВТ-15 в связи с их радиоактивностью связано с определенными ограничениями. Активированный вольфрам (лантанированный, иттрированный) рекомендуется применять для автоматической аргонодуговой сварки конструкций ответственного назначения. Для ручной сварки применяют лантанированный или чистый вольфрам, последний для конструкций неответственного назначения.

Нормальное состояние рабочей поверхности электрода из чистого вольфрама — сферическая поверхность расплавленной капли, а активированного электрода — плоская разогретая поверхность с отдельными мелкими оплавленными участками. Если образуется сплошная капля с шейкой, то оплавленную часть электрода удаляют на шлифовальном круге.

Отбор из баллонов аргона и гелия осуществляют через понижающий редуктор при давлении 0,02—0,15 МПа в зависимости от необходимого расхода. Для сварки в аргонодуговой среде используют редуктор АР-40, а для сварки в гелии — редуктор Г-70. Применяют также кислородные редукторы РК-53, РКД-8-61 и другие в сочетании с расходомерами поплавкового типа — ротаметрами (табл. 17).

Таблица 16

Допустимые значения постоянного тока прямой и обратной полярности для электродов различных марок

Диаметр электрода, мм	Максимальный сварочный ток (А) для вольфрамовых электродов при полярности			
	ЭВЧ		ЭВЛ	
	прямой	обратной	прямой	обратной
2,0	50—90	20—25	110—150	30—35
3,0	160—200	30—35	240—280	40—45
4,0	320—370	40—50	470—520	50—60
5,0	570—600	50—70	680—740	60—80
6,0	—	70—90	—	80—110
8,0	—	110—140	—	120—160
10,0	—	160—210	—	170—220

Диаметр электрода, мм	Максимальный сварочный ток, (А) для вольфрамовых электродов при полярности			
	ЭВТ-15		ЭВИ-3	
	прямой	обратной	прямой	обратной
2,0	140—180	35—40	160—200	40—50
3,0	300—340	45—50	320—360	50—70
4,0	530—580	60—70	600—660	70—80
5,0	770—830	70—90	860—920	80—110
6,0	—	90—120	—	100—130
8,0	—	140—180	—	160—200
10,0	—	200—250	—	220—270

Таблица 17

Расход аргона и гелия для различных ротаметров

Ротаметр	Пределы измерения, л/мин		
	по воздуху	по аргону	по гелию
РС-3	3,30—16,70	2,80—14,20	8,96—45,40
РС-3А	0,10—1,00	0,08—0,85	0,26—2,70
РС-5	10,50—66,70	8,90—56,60	28,5—181,00
РМ-I	0,66—2,66	0,56—2,26	1,80—7,20
РМ-II	4,10—10,50	3,50—8,90	11,20—28,40
РМ-III	16,60—26,60	14,10—21,30	44,80—68,10
РМ-IV	41,60—105,00	35,30—84,00	112,90—268,80

Завод-изготовитель определяет пределы измерения ротаметра по воздуху. Для их использования необходимо пересчет ротаметра для каждого инертного газа по формуле:

$$Q = Q_0 \sqrt{p/p_0} \sqrt{\gamma_0/\gamma},$$

где Q — расход инертного газа, л/мин; Q_0 — расход воздуха при давлении 0 МПа для данного ротаметра (по паспорту для каждого деления используемого ротаметра), л/мин; p — рабочее давление (заданное), МПа; p_0 — давление воздуха при тарировании ротаметра, МПа; γ_0 — плотность воздуха при 20 °С (0,00129 г/см³); γ — плотность инертного газа (гелия — 0,00017 г/см³, аргона — 0,00178 г/см³).

Обычно смесь аргона с гелием получают в смесителе. При полуавтоматической сварке можно использовать постовой газовый смеситель УКП-1-71, предназначенный для получения смеси кислород—углекислый газ. Диаметр проходных сечений дюз: для аргона 0,57 мм, для гелия 0,49 мм. К входу «Кислород» подключают через редуктор баллон с аргоном, а к входу «Углекислый газ» — баллон с гелием. Аргон подается под давлением 0,5 МПа, а гелий — 0,2 МПа. Для больших расходов газов, обычно при автоматической сварке плавящимся электродом, используют упрощенный смеситель — сосуд из коррозионно-стойкой стали или алюминия объемом 2—8 л, внутри которого установлены три-четыре ряда латунных или никелевых сеток с 400—600 отв/см². При этом расход каждого газа измеряется градуированными ротаметрами (рис. 7).

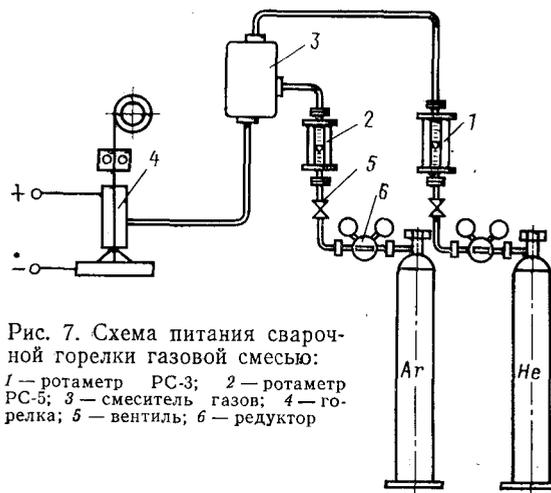


Рис. 7. Схема питания сварочной горелки газовой смесью: 1 — ротаметр РС-3; 2 — ротаметр РС-5; 3 — смеситель газов; 4 — горелка; 5 — вентиль; 6 — редуктор

Сварка плавящимся электродом. Электрическая дуга горит между изделием и плавящимся электродом, который подается в зону дуги обычно с постоянной скоростью.

Автоматическую и полуавтоматическую сварку плавящимся электродом применяют для получения стыковых, тавровых, нахлесточных и других соединений металла толщиной 4—6 мм и более (автоматическая сварка преимущественно для металла толщиной 10—12 мм и более). Экономическая целесообразность применения сварки плавящимся электродом возрастает с увеличением толщины металла, глубокое проплавление которого обеспечивает процессу высокую производительность. Этим способом сварки удается получать надежное проплавление корня шва при сварке тавровых и нахлесточных соединений.

Конструкция механизма подачи должна обеспечивать надежное и стабильное поступление мягкой алюминиевой проволоки. Обычно в таких механизмах предусматривают две пары ведущих и прижимных роликов, что уменьшает возможность проскальзывания проволоки и ее сминания. Ролики применяют без насечки. Внутренняя поверхность стальной трубки в горелке, по которой движется проволока, должна быть обработана с максимальной чистотой. Сопло горелки должно обеспечивать надежную защиту инертным газом жидкой сварочной ванны. Диаметр сопел горелок для автоматической сварки 26—32 мм, для полуавтоматической 18—22 мм.

Токоподводящие наконечники обычно изготавливают из меди. Срок их службы 30—40 ч. Медно-графитовые наконечники склонны к более быстрому износу (срок службы 8—10 ч), однако они обеспечивают надежный токосъем и хорошие условия скольжения проволоки.

Длина видимой части дуги при сварке составляет 2—6 мм, расстояние от мундштука до торца сопла 8—10 мм, расстояние от торца сопла до изделия 5—15 мм. Сварку осуществляют «углом вперед», угол наклона горелки 75—80° (рис. 8). Сварку плавящимся электродом в защитных газах выполняют на постоянном токе обратной полярности. Источники питания сварочной дуги должны иметь жесткую (проволока диаметром до 2,5 мм) или пологопадающую (проволока диаметром более 2,5 мм) внешнюю характеристику.

При сварке в аргоне плавящимся электродом диаметром до 2,5 мм трудно избежать образования пор в металле шва. Повысить качество металла шва алюминиевых сплавов (Al—Mg, Al—Zn—Mg) удалось применением техники управляемого переноса металла при импульсно-дуговой сварке.

Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом отличается от обычной тем, что на постоянный ток обратной полярности, получаемый от основного источника питания, накладываются кратковременные импульсы тока с заданной частотой следования, генерируемые импульсным устройством для получения мелкокапельного направленного переноса электродного металла через дугу при более низких значениях сварочного тока, чем это имеет место при естественном мелкокапельном переносе. Величину и длительность импульсов сварочного тока выбирают такими, чтобы можно было обеспечить управляемый перенос металла с торца электрода небольшими каплями в широком диапазоне токов. В паузах между импульсами значение тока небольшое, но достаточное для поддержания горения сварочной дуги, при котором ввод теплоты в изделие уменьшается и отсутствует перенос металла.

Импульсно-дуговая сварка обеспечивает повышение механических свойств наплавленного металла и сварных соединений в целом, улучшает стабильность процесса, позволяет выполнять сварку в различных пространственных положениях с улучшенным формированием швов, использовать проволоку диаметром 0,8—1 мм и получать соединения металла минимальной толщины 1—3 мм, существенно стабилизировать провар корня шва.

В последнее время при сварке плавящимся электродом металла средних и больших толщин находят применение сварка в смеси инертных газов аргона с гелием. По сравнению с аргонем гелий повышает концентрацию энергии в приэлектродных пятнах и обуславлива-

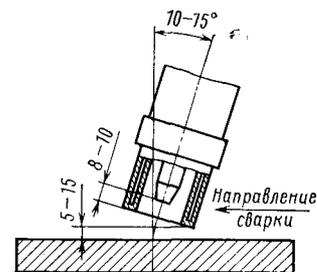


Рис. 8. Расположение горелки при автоматической аргонодуговой сварке плавящимся электродом

ет более высокий градиент температур в столбе дуги. Применение смеси защитных газов повышает тепловую мощность дуги, температуру сварочной ванны. Особенно эффективно применение гелия для сварки алюминия высокой и технической чистоты, теплопроводность которых выше по сравнению с алюминиевыми сплавами. При введении гелия в настроенную на аргон систему дуга укорачивается, а ток несколько снижается. Для сохранения устойчивости процесса и силы сварочного тока необходимо повысить напряжение холостого хода источника питания. Это приводит к росту напряжения дуги на 20—30 % и соответственно на столько же требует увеличения скорости подачи проволоки, в результате чего возрастают глубина и ширина провара.

При равной погонной энергии скорость сварки в смеси газов на 40—50 % выше, чем в аргоне. Металл толщиной 20—25 мм можно сваривать за один проход с каждой стороны без скоса кромок. Допускается повышенный зазор в стыках.

Применение в качестве защитной атмосферы смеси аргона (25—40 %) с гелием (75—60 %) при автоматической сварке позволяет снизить объем пустот в металле шва в 2—2,5 раза. Для полуавтоматической сварки используют смесь, состоящую из 50 % каждого газа (табл. 18, 19).

При сварке плавящимся электродом по глубокой V-образной разделке впереди дуги скапливаются брызги электродного металла, которые, попадая в дуговой промежуток, нарушают режим сварки. Чтобы исключить это, скопившиеся впереди дуги брызги обычно удаляют скребком. В таких случаях целесообразно применять рюмкообразную или трапециевидную разделку кромок особенно при использовании проволоки диаметром 3—5 мм. При многослойной односторонней сварке в разделку кромок рекомендуется первые один—три прохода выполнять неплавящимся электродом, который обеспечивает более качественное формирование обратной стороны шва, а остальные проходы — плавящимся. Иногда для уменьшения усиления швов, выполняемых плавящимся электродом, применяют неглубокую, но широкую разделку кромок под углом 90—120°.

Полуавтоматическую сварку стыковых соединений без разделки кромок в нижнем (рис. 9) и вертикальном положениях выполняют обычно без поперечных колеба-

Таблица 18

Ориентировочные режимы автоматической и полуавтоматической импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом в аргоне (стыковые соединения)

Подготовка кромок, характер выполненного шва	Толщина металла, мм		Диаметр электродной проволоки, мм	Напряжение на моменте постановки тока во время сварки, В	Переменное напряжение на ИТП-1, В	Напряжение холостого хода на ИТП-1, В	Среднее значение напряжения дуги, В	Среднее значение сварочного тока, А	Частота импульсов тока, Гц	Скорость сварки, м/ч	Скорость подачи проволоки, м/ч	Число проходов	Расход аргона, л/мин	Примечание
	ММ	ММ												
Без скоса кромок, односторонний, на съёмной подкладке	1,0	0,8	17,5—18 17,5—18 17,5—18 19—20 20—21 22—23 23—24 24—25	19	100	100	17,5—18	65—70	50	50	440	1	10—12	
	2,0	1,0												
	3,0	1,6												
	4,0	1,6												
	5,0	1,6												
	6,0	2,0												
	9,0	2,0												
	12,0	2,0												
	12,0	2,0												
	12,0	2,0												
С прямолинейным скосом двух кромок, угол 90°, при углублении 2 мм, односторонней, на съёмной подкладке	35,0	3,0	24—25	—	90	90	24—25	360—370	50	25	260	8	25—28	Для корневого шва остальных проходов
	35,0	3,0												
	35,0	4,0												
	40,0	4,0												
	40,0	4,0												
	40,0	4,0												
	40,0	4,0												
	40,0	4,0												
	40,0	4,0												
	40,0	4,0												
С двумя симметричными прямолинейными скосами двух кромок, угол 90°, двусторонней, притупление: 3—4 мм, 5—6 мм 3—5 мм	35,0	3,0	21—22 26—27	—	90	90	21—22 26—27	410—420 460—470	100	22	126	6	25—28	Для корневого шва остальных проходов
	40,0	4,0												
С двумя симметричными прямолинейными скосами двух кромок, угол 90°, двусторонней, притупление: 3—4 мм, 5—6 мм 3—5 мм	40,0	4,0	25—26	—	90	90	25—26	420—430	100	25	130	6	25—28	Для остальных проходов
	40,0	4,0												

Ориентировочные режимы автоматической и полуавтоматической сварки технического алюминия и сплава АМц плавящимся электродом в смеси аргона и гелия

Подготовка кромок стыкового двустороннего шва	Толщина металла, мм	Диаметр электродной проволоки, мм	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость подачи проволоки, м/ч	Скорость сварки, м/ч	Расход газов в смеси, л/мин	
							Аргон	Гелий
Автоматическая сварка								
Без скоса кромок	10	2	240—270	30—33	250—260	17—20	13—15	42—45
	12	2	260—290	30—33	260—280	15—18	13—15	42—45
	12	2,5	330—380	30—33	205—245	24—28	13—15	42—45
	16	2,5	390—430	30—33	250—290	18—22	13—15	42—45
	22	3,15	440—480	32—35	290—320	16—18	16—18	48—52
	22	3,15	450—490	32—35	210—235	16—18	16—18	48—52
	25	3,15	440—490	32—35	290—330	14—16	16—18	48—52
	25	3,15	450—490	32—35	210—235	15—17	16—18	48—52
	28—30	4	480—530	33—35	230—245	12—14	16—18	48—52
	28—30	4	480—530	33—35	185—210	13—15	16—18	48—52
Полуавтоматическая сварка								
Без разделки кромок с двумя симметричными криволинейными скосами двух кромок (угол 30°, радиус 8—10 мм, приуглубление 8—10 мм)	10—12	2	240—280	29—32	240—260	—	15	15
	12—30	2	260—300	29—32	250—290	—	15	15

Примечания. 1. Первый шов во избежание прожогов сваривают на подкладке без канавки.

2. Для подвода гелия и смеси газов к сварочному автомату для исключения утечки газа следует применять вакуумные шланги.

3. Для автоматической сварки используют горелку с внутренним диаметром сопла 28 мм.

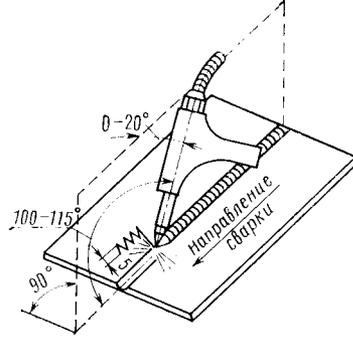


Рис. 9. Расположение горелки при полуавтоматической аргонодуговой сварке плавящимся электродом в нижнем положении

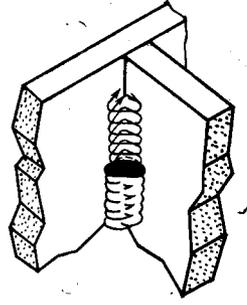


Рис. 10. Траектория движения конца электрода при выполнении углового шва на вертикальной плоскости

ний торца электрода. При наличии разделки кромок первый шов выполняют также без поперечных колебаний, а последующие швы — с небольшими (до 5 мм) перемещениями электрода.

При сварке угловых швов в нижнем положении угол наклона горелки от вертикальной стенки 30—45°. Сварку угловых швов на вертикальной плоскости ведут снизу вверх углом вперед. Однопроходную сварку можно выполнять с перемещениями конца электрода, как показано на рис. 10. Угловые швы больших сечений на вертикальной плоскости выполняют многослойными швами путем наложения узких валиков. Так же выполняют и стыковые горизонтальные швы. Для заварки кратера горелку возвращают в обратном направлении на расстояние, ненамного превышающее длину кратера, при одновременном снижении скорости подачи проволоки (рис. 11).

Для сварки плавящимся электродом используют источники питания — выпрямители ВДУ-504, ВДУ-1201 серии ВС, а также преобразователи ПСГ-500-1, ПСУ-500 и др.

Автоматическую сварку выполняют подвесными аппаратами АГП-2 (диаметр проволоки 1—2,5 мм, сварочный ток до 400 А), АГП-4 (диаметр проволоки 0,6—2,5 мм, сварочный ток до 300 А), аппаратами тракторного типа АДСП-2 (диаметр проволоки 1—2,5 мм, сва-

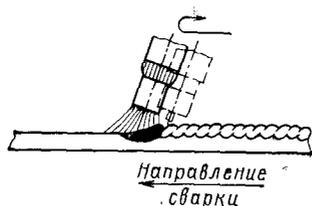


Рис. 11. Движение горелки при заварке кратера

рочный ток до 400 А), ТС56 (диаметр проволоки 1,6—4 мм; сварочный ток до 600 А), аппаратами кареточного типа А1431 (диаметр проволоки 1,6—5 мм, сварочный ток до 600 А). Могут быть использованы аппараты тракторного типа ТС-17М, АДС-500, АДС-1000, которые следует снабдить специальными горелками и в которые необходимо внести небольшие конструктивные изменения. Для полуавтоматической сварки используют полуавтоматы тянущего типа ПШП-10 (диаметр проволоки 1—2,5 мм, сварочный ток до 300 А), тянуще-толкающего типа ПДА-300 (диаметр проволоки 1,6—2,5 мм, сварочный ток до 300 А), толкающего типа ПРМ-4 (диаметр проволоки 1,2—2,5 мм, сварочный ток до 500 А). Полуавтомат ПРМ-4 ранцевый.

Для осуществления процесса импульсно-дуговой сварки используют генераторы импульсов ГИ-ИДС-1 и ГИД-1, которые включают параллельно с основным источником питания. Импульсное устройство ИУП-1 на токах до 350 А является самостоятельным источником питания. На токах свыше 350 А устройство работает как генератор импульсов вместе с серийным источником постоянного тока и подключается к нему последовательно. Устройство ИУП-1, как и другие генераторы импульсов, пригодно для полуавтоматической и автоматической сварки. Выпрямитель ВДГИ-301 для импульсно-дуговой сварки комплектуется полуавтоматом ПДГИ-303.

Сварка вольфрамовым электродом переменным симметричным током. Электрическая дуга горит между изделием и неплавящимся вольфрамовым электродом. Присадочный металл вводят в сварочную ванну по необходимости независимо от сварочного тока. Способ находит применение для сварки стыковых, нахлесточных, тавровых, торцовых и других соединений, получения стыковых швов на вертикальной плоскости при двусторонней сварке в одну общую ванну одновременно двумя сварщиками. Ручную сварку рекомендуется применять для металла толщиной до 10 мм, а автоматическую — для металла толщиной до 16 мм (табл. 20, 21). Во избежание попадания вольфрама в шов дугу зажи-

Ориентировочные режимы ручной аргодуговой сварки алюминиевых сплавов неплавящимся вольфрамовым электродом

Форма подготовки кромок, характер выполненного шва	Толщина металла, мм	Диаметр вольфрамового электрода, мм	Диаметр присадочного прутка, мм	Сварочный ток, А	Расход аргона, л/мин	Число слоев
С отбортовкой двух кромок, стыковой односторонний	1	1,5—2	—	50—75	4—5	1
	1,5	2	—	60—90	5—6	1
Без скоса кромок, стыковой двусторонний	2	2—3	—	80—110	5—6	1
	3	3—4	2,5—3	100—140	7—8	2
Без скоса кромок, стыковой односторонний, на подкладке	4	4	3	140—180	7—8	2
	5	5	3—4	220—240	8—10	2
С прямолинейным скосом двух кромок (угол 70—80°, притупление 2—3 мм), стыковой односторонний, на съемной подкладке	6	5	3—4	250—270	8—10	2
	2	3—4	2—2,5	80—100	7—8	1
С двумя симметричными прямыми скосами двух кромок (угол 70°, притупление 2—3 мм), стыковой, двусторонний	3	4	3	150—170	7—8	1
	4	4—5	3	200—220	7—8	1
Тавровое и нахлесточное соединение	5	5	3	220—250	8—10	1
	6	5—6	3—4	240—280	8—10	1
Тавровое и нахлесточное соединение	5—12	5	3—5	180—220	10—12	2—5
		6		240—280	12—14	
Тавровое и нахлесточное соединение	8—16	5	4—5	180—220	10—12	3—6
		6		240—280	12—14	
Тавровое и нахлесточное соединение	2	2—3	1,5—2	100—120	5—6	1
	3—4	3—4	2	170—190	7—8	1
Тавровое и нахлесточное соединение	5—6	4—5	3—4	260—280	8—10	1—2
	7—8	5—6	4	280—300	8—12	2—3
Тавровое и нахлесточное соединение	10	5—6	4—5	300—320	12—14	3—4

Примечания: 1. Скорость сварки при наложении одного валика 4—5 м/ч.
2. При сварке вертикальных, горизонтальных и потолочных швов сварочный ток необходимо снижать на 10—25%.

гают на технологической или графитовой пластине. Дуга зажигается, когда электрод находится на расстоянии ~2—3 мм от пластины. После разогрева торца вольфрамового электрода, не прерывая дуги, ее переносят на изделие. Вольфрамовый электрод следует

Таблица 21

Режимы автоматической однопроходной аргодуговой сварки неплавящимся вольфрамовым электродом стыковых соединений (без скоса кромок на подкладке) из алюминиевых сплавов

Толщина металла, мм	Диаметр вольфрамового электрода, мм	Диаметр присадочной проволоки, мм	Сварочный ток, А	Скорость подачи проволоки, м/ч	Скорость сварки, м/ч	Расход аргона, л/мин	Диаметр сопла горелки, мм
1,5	4	2	80—110	40—45	15—20	7—8	18—20
2	4	2	110—130	36—42	15—20	8—9	18—20
3	4	2	150—170	36—40	10—16	12—16	18—20
5	6	2	240—260	30—35	10—14	12—16	18—20
8	10	2—3	430—450	—	10—12	28—30	30—34
10	10	2—3	480—520	—	9—10	28—30	30—34
14	10	2—3	550—600	—	6	28—30	30—34

Примечания: 1. При сварке в аргоне напряжение дуги 10—14 В, при сварке в смеси аргона с гелием напряжение повышается на 4—8 В.
2. Расход газа при использовании гелия увеличивается в 1,8—2 раза.
3. При сварке чистого алюминия ток увеличивают на 10—15%.

располагать к изделию под углом 60—80°. Угол между вольфрамовым электродом и присадочной проволокой обычно составляет 80—90° (рис. 12). Расстояние от нижнего края торца сопла до изделия должно быть минимальным (5—10 мм), но достаточным для наблюдения за сварочной дугой и концом электрода. Увеличение этого расстояния приводит к ухудшению эффективности газовой защиты, требует повышенного расхода защитного газа. Длина выступающей из сопла части вольфрамового электрода должна составлять 2—5 при сварке стыковых и до 8 мм при сварке тавровых соединений. Использование сопел с металлическими сетками, пористыми перегородками позволяет получать ламинарный стабильный поток газа на большем расстоянии от торца сопла до изделия и увеличивать вылет вольфрамовых электродов в 1,5—2 раза (рис. 13).

При сварке тавровых стыковых соединений газовая струя при выходе из сопла горелки натекает на поверхность свариваемого изделия, что приводит к расширению зоны защиты. Торцовые соединения, наоборот, имеют небольшую отражающую поверхность, что может привести к попаданию воздуха в зону сварки. В этом случае ниже уровня шва устанавливают специальные

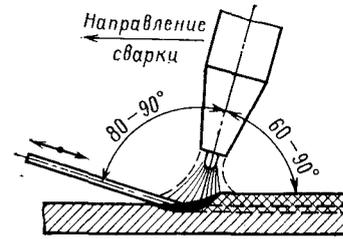


Рис. 12. Расположение горелки и присадочной проволоки при ручной аргодуговой сварке неплавящимся электродом

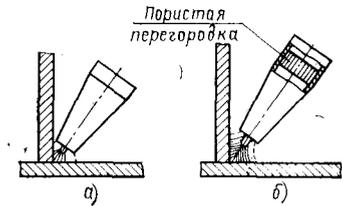


Рис. 13. Расположение горелки при аргодуговой сварке вольфрамовым электродом угловых швов: а — без газовой линзы; б — с газовой линзой

отражающие пластинки-экраны. При сварке встык листов и труб, собранных с зазором без подкладки, возможен подсос воздуха через зазор. Для исключения подсоса внутрь трубы вдувается аргон или гелий, защищающий корень шва.

Перемещение электрода и присадочной проволоки во время ручной сварки должно быть равномерно поступательным. Конец присадочного прутка вводится в сварочную ванну и не должен находиться за пределами зоны газовой защиты. Поперечные колебания прутка и вольфрамового электрода не рекомендуются. Сварку следует вести при минимальной длине дуги (1—5 мм) на максимальных для данной толщины материала сварочном токе и скорости сварки. Обычно ручная сварка ведется „левым” способом.

В целях повышения производительности процесса двустороннюю сварку вертикальных швов на вертикальной плоскости металла толщиной до 16 мм производят два сварщика в одну ванну (рис. 14). Требуется разделка двух кромок (угол 90°, притупление 2—2,5 мм).

Для зажигания дуги при автоматической сварке часто используют графитовый или угольный электрод. Горелку устанавливают к изделию под углом 80—90°. Автоматическую сварку изделий выполняют в приспособлениях, обеспечивающих плотную сборку свариваемых кромок и их удержание в процессе сварки. Обычно сварку проводят за один проход с одной или двух сторон. При односторонней сварке изделий необходимо предусматривать проплавление кромок на всю толщину и

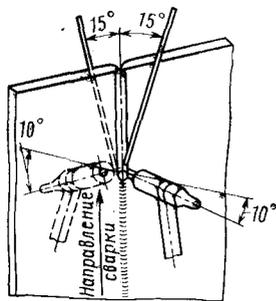


Рис. 14. Расположение горелки и при-
садочной проволоки при сварке одно-
временно двумя сварщиками верти-
кальных швов на вертикальной плос-
кости

формирование усиления с обрат-
ной стороны шва. При двусто-
ронней сварке перед наложением
шва с обратной стороны требует-
ся механическая обработка до
металла шва.

Применение смеси газов аргона (50—70%) с гелием (50—30%) обеспечивает увеличение глубины про-
плавления металла, повышение в 1,5—2 раза скорости
сварки и снижение объема пустот в металле шва.

Для ручной сварки выпускают установки УДГ-301 и
УДГ-501 соответственно на номинальные токи 315 и
500 А. В комплект установок входят горелки — малая
(ток до 200 А), средняя (ток до 400 А) и большая (ток
до 500 А, только в комплекте УДГ 501), охлаждаемые
водой. Источники типа ИПК-350 рассчитаны на номи-
нальный ток 350 А. При отсутствии указанных устано-
вок может быть использован сборный пост (рис. 15),
укомплектованный горелками ЭЗР и АР10. Горелки

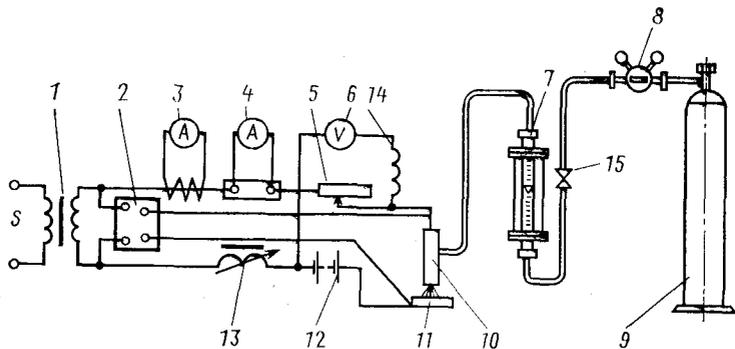


Рис. 15. Пост для ручной или автоматической дуговой сварки не-
плавящимся электродом в инертных газах:

1 — сварочный трансформатор; 2 — осциллятор; 3 — амперметр переменного
тока; 4 — амперметр постоянного тока; 5 — балластный реостат; 6 — вольтметр;
7 — ротаметр; 8 — редуктор; 9 — баллон с газом; 10 — горелка; 11 — стол свар-
щика; 12 — аккумулятор; 13 — дроссель; 14 — высокочастотный дроссель; 15 —
вентиль

ЭЗР5, ЭЗР5-66, ЭЗР3-58 и ЭЗР-4 рассчитаны на номи-
нальные токи соответственно 75, 150, 200 и 500 А.

Для автоматической сварки неплавящимся электро-
дом используют автоматы АСТ-11 для сварки в монтаж-
ных условиях неповоротных стыков труб диаметром 8—
220 мм, подвесные головки АГВ-2, АГВ-5 для сварки
на токах до 300 А, автомат АРК-3 радиально-консоль-
ного типа, снабженный сварочной головкой АСГВ для
сварки на токах до 300 А, автомат кареточного типа
АДСВ-5 (ток до 300 А) и автоматы тракторного типа
АДСВ-2 и АДСВ-6. Горелки А954 и А1272 конструкций
ИЭС им. Е. О. Патона позволяют сваривать на токах
до 1000 А с использованием вольфрамовых электродов
диаметром до 10 мм. Источники питания для автома-
тической сварки те же, что и для ручной сварки. В ря-
де случаев целесообразно использовать сварку вольфра-
мовым электродом импульсной дугой. Технологические
преимущества импульсной дуги лучше всего проявля-
ются при сварке тонколистового материала. Весьма эф-
фективно использование импульсной дуги для сварки
швов на вертикальной плоскости и в потолочном поло-
жении. При этом снижаются требования к квалифика-
ции сварщика. Имеются приставки к установкам УДГ,
позволяющие производить сварку в импульсном режиме.

**Сварка трехфазной дугой вольфрамовым электродом
переменным током.** К двум вольфрамовым электродам
и свариваемому изделию подводится переменный ток
от трехфазного источника питания (рис. 16). Одновре-
менно горят три дуги — между каждым из электродов
и изделием и независимая дуга меньшей мощности меж-
ду электродами. Трехфазная дуга отличается высокой
устойчивостью горения и более высокой по сравнению с
однофазной производительностью процесса за счет по-
вышения проплавливающей способ-
ности.

При сварке трехфазной дугой
имеется возможность в широких
пределах регулировать характер

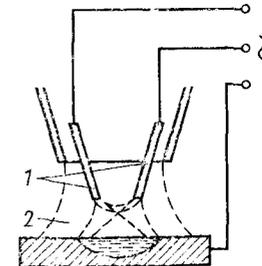


Рис. 16. Схема сварки в среде инертных
газов трехфазной дугой с неплавящимся
электродами:

1 — вольфрамовые электроды; 2 — струя инертного
газа

тепловложения в кромки за счет перераспределений мощности путем изменения соотношения тока в детали и токов в электродах, изменения положения электродов относительно плоскости стыка. При последовательном расположении электродов достигается большая глубина проплавления, при параллельном получают широкие швы с малой глубиной проплавления.

Трехфазную дугу используют в основном для автоматической сварки стыковых соединений в нижнем положении. Сварку производят с присадкой или без нее (табл. 22). Без разделки кромок за один проход сваривают

Таблица 22

Ориентировочные режимы односторонней автоматической сварки трехфазной дугой стыковых соединений алюминиевых сплавов

Толщина металла, мм	Диаметр вольфрамового электрода, мм	Ток, А		Скорость подачи проволоки, м/ч	Скорость сварки, м/ч	Расход аргона, л/мин
		в электродах	в деталях			
4	4	210—230	350—380	30—40	30	10—15
6	5	240—270	420—460	30—40	25	10—15
8	6	310—350	520—580	30—40	20	10—15
10	8	430—500	620—710	40—50	15	15—18
20	10	550—620	920—1000	40—50	10	35—40
25	10	580—650	950—1050	50—80	10—12	35—40
30	10	600—700	1100—1200	60—80	8—9	35—40

металл толщиной до 30 мм. Меньшие толщины относятся к техническому алюминию, причем для металла толщиной более 10 мм требуется контролируемый зазор. Большие толщины сваривают погруженной дугой. Горелку устанавливают к изделию под углом 80—90°.

Для трехфазной сварки применяют источники питания: ИТД 600/1000, ИТДИ-125, ИТДИ-315. Последние два источника могут работать как в непрерывном, так и в импульсном режиме. Используют головки типа АГТФ или предназначенные для сварки однофазной дугой, снабженные двухэлектродными горелками.

Сварка вольфрамовым электродом переменным асимметричным током. Данный метод используют для ручной и автоматической сварки стыковых, угловых и отбортованных соединений.

По сравнению с аргонодуговой сваркой симметричным переменным током (неплавящимся электродом) сварка асимметричным током алюминиевых сплавов расширяет технологические возможности за счет регулирования параметров тока прямой и обратной полярности. Преобладание составляющей тока прямой полярности приводит к увеличению глубины проплавления и скорости сварки, а также к повышению стойкости вольфрамового электрода. Преобладание тока обратной полярности улучшает очистку свариваемого металла от окисной пленки и улучшает качество формирования шва.

Характеристиками асимметричного тока являются сила тока прямой и обратной полярности, а также коэффициент асимметрии $k_{ас}$, определяемый отношением среднего значения составляющей тока прямой $I_{пр.ср}$ полярности к сумме средних значений токов прямой и обратной $I_{обр.ср}$ полярностей

$$k_{ас} = I_{пр.ср} / (I_{пр.ср} + I_{обр.ср}).$$

Действующее значение асимметричного тока и коэффициента асимметрии определяют по показаниям амперметров, установленных на источнике питания, с помощью номограммы.

Для сварки асимметричным током используют специальные источники питания типа ОАРС. Автоматы, горелки, подготовка сварочных материалов, требования к сборке изделий, техника и технология сварки те же, что и при обычной аргонодуговой сварке неплавящимся электродом симметричным переменным током. Ориентировочные режимы автоматической односторонней односторонней сварки стыковых соединений из алюминиевых сплавов асимметричным током промышленной частоты приведены в табл. 23.

Сварка вольфрамовым электродом постоянным током прямой полярности в гелии. По сравнению с другими способами сварки неплавящимся электродом этот метод отличается повышенной проплавающей способностью и скоростью сварки. Сравнительно малая погонная энергия приводит к уменьшению тепловложения в основной металл, уменьшению зоны термического влияния и формированию более узких, чем при аргонодуговой сварке переменным током, швов. При этом проч-

Таблица 2

Режимы автоматической сварки стыковых соединений из алюминиевых сплавов асимметричным током

Толщина металла, мм	Среднее значение тока, А		Сварочный ток, А	Скорость сварки, м/ч	Коэффициент асимметрии, $k_{ас}$	Диаметр вольфрамового электрода, мм	Расход аргона, л/мин
	прямого $I_{пр.ср}$	обратного $I_{обр.ср}$					
3—4	65—85	85—65	160—200	15—20	0,45—0,55	4—5	6—8
5—6	100—115	115—100	240—280	14—18	0,45—0,55	5—6	8—10
8—10	200—240	160—130	400—480	10—12	0,55—0,65	8	18—24
12—14	260—300	200—180	540—620	7—8	0,55—0,65	10	26—30
16	290—330	220—190	580—660	4—5	0,55—0,65	10	26—30

Примечание. Для $I_{пр.ср}$ и $I_{обр.ср}$ тока приведены средние значения, замеренные магнитоэлектрическими приборами.

ность сварных соединений термообрабатываемых сплавов на 10—15% выше.

Наибольшая эффективность процесса обеспечивается при небольшом дуговом промежутке с погружением дуги в основной металл. Поддерживать вручную необходимую длину дуги практически невозможно. Поэтому применяют автоматические системы регулирования напряжения дуги (АРНД). При этом сварочные горелки должны иметь механизм перемещения электрода (горелки А1490 и А1736). При работе на сборном рабочем посту допускается использование отдельных блоков регулирования напряжения дуги с чувствительностью 0,1—0,2 В (рис. 17).

Колебания уровня сварочной ванны отрицательно сказываются на работе системы АРНД. Поэтому допустимый зазор при сварке не должен превышать 0,5 мм, а смещение кромок должно быть не более 10%, но не более 1 мм.

В связи с изложенным сварку постоянным током прямой полярности в гелии выполняют в основном автоматическим способом. Для этого используют подвесные головки, например ГСУ-7, автоматы контрольного типа АРК, автоматы тракторного и кареточного типов АДСВ-5, АДСВ-2, АСТВ-2М и др. Источники питания должны обеспечивать напряжение холостого хода 60—65 В.

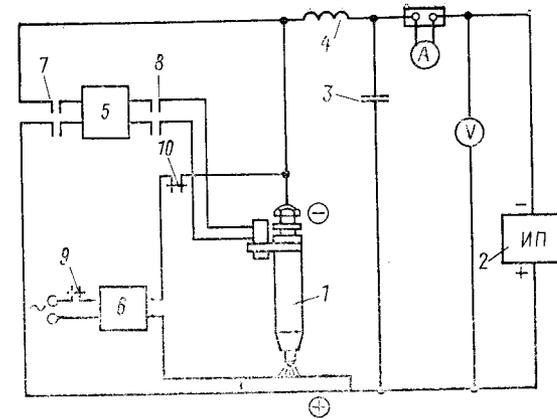


Рис. 17. Схема поста для дуговой сварки вольфрамовым электродом в гелии на постоянном токе прямой полярности:

1 — сварочная горелка; 2 — источник питания; 3, 4 — фильтр защиты источника питания; 5 — блок автоматического регулирования напряжения дуги; 6 — осциллятор; 7—9 — контакты реле защиты блока АРНД, электродвигателя горелки и отключения осциллятора; 10 — контакт отключения выходной обмотки осциллятора

Для сварки используют выпрямители ВСВУ, ВДУ или генераторы с падающей характеристикой. Для возбуждения дуги применяют осцилляторы типа ОСПЗ-2М и др.

Указанным способом выполняют стыковые соединения без разделки кромок. Односторонняя сварка изделий предусматривает проплавление кромок на всю толщину и формирование усиления с обратной стороны шва. Зазор между свариваемым металлом и подкладной устройством с формирующей обратной сторону шва канавкой не должен превышать 0,5 мм. Для сварки соединений толщиной до 12 мм необходима симметричная конусная заточка вольфрамового электрода с углом в вершине 90° (рис. 18, а). Для сварки больших толщин применяют заточку с эксцентричным смещением вершины конуса электрода в сторону направления сварки (рис. 18, б). Подобная заточка электрода смещает дугу

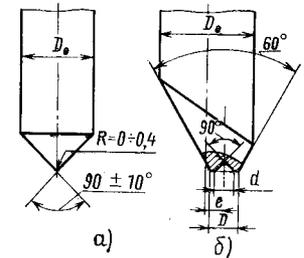


Рис. 18. Форма и размеры рабочего торца неплавящегося электрода

к передней кромке ванны, способствуя ее более быстрому оплавлению, спокойному течению металла и лучшему формированию шва. Диаметр неплавящегося электрода и форму заточки рабочего торца выбирают в зависимости от толщины свариваемого металла (табл. 24).

Таблица 24
Диаметр вольфрамового электрода и форма заточки торца

Толщина металла, мм	Диаметр наружной заточки электрода D_0 , мм	Диаметр наружной заточки D , мм	Диаметр внутренней заточки d , мм	Эксцентриситет e , мм	Примечание
5—6	4	—	—	—	
6—8	5	—	—	—	
8—12	6	—	—	—	
8—12	5	2	1,2	1	Рис. 18, б
12—16	6	2,6	2,0	1,2	
16—20	8	3,5	2,7	1,5	

Сварку соединений производят с подачей присадочной проволоки или без нее. Диаметр присадочной проволоки зависит от толщины свариваемого металла:

Толщина свариваемого металла, мм	До 3	4—10
Диаметр присадочной проволоки, мм	2	2—2,5

Сварку выполняют углом вперед с наклоном электрода на 80—90°. Угол между электродом и присадочной проволокой ~ 90°. Расстояние от торца сопла до изделия 3—5 мм. Ориентировочные режимы односторонней сварки приведены в табл. 25.

Плазменная сварка (сжатой дугой) постоянным током обратной полярности (табл. 26). Высокая плотность тока в столбе дуги, большая концентрация энергии при плазменном процессе позволяют повысить скорость сварки, улучшить зону термического влияния и уменьшить деформацию конструкций по сравнению с аргонодуговой сваркой переменным током.

Процесс горения дуги весьма устойчив, а малая чувствительность к колебаниям ее длины значительно облегчает операцию сварки.

Таблица 25

Режимы автоматической сварки неплавящимся электродом постоянным током прямой полярности в гелии

Толщина металла, мм	Сварочный ток, А		Скорость сварки, м/ч	Расход гелия, л/мин	Примечание
	Сплав				
	1201	АМг6			
4	100—140	140—160	15—30	15—25	Сварка с присадочной проволокой Сварка без присадочной проволоки
6	160—240	220—260	12—25	20—30	
8	220—320	300—340	10—20	25—35	
10	280—380	370—420	8—15	25—35	
8	200—330	250—310	12—24	25—35	
10	240—390	310—380	10—18	25—35	
12	290—440	370—450	8—14	30—40	
14	380—500	440—520	7—12	30—40	
16	380—530	490—580	6—10	30—40	
18	410—540	540—610	5—7	30—40	

Примечание. Напряжение дуги для сплава 1201 12—14 В, для сплава АМг6 10—12 В.

Вольфрамовый электрод для повышения его стойкости в плазменной горелке запрессовывают в охлаждаемую медную обойму. Глубина погружения медно-вольфрамового электрода относительно среза формирующего сопла составляет 1,5—2,5 мм. При более глубоком погружении медно-вольфрамового электрода в сопло затрудняется возбуждение дежурной дуги, а также возбуждение и горение основной дуги. Рабочий конец вольфрамового электрода должен быть чистым и заточен наподобие с медной обоймой электрододержателя. Наличие меди на рабочем торце вольфрамового электрода не допускается. Оплавленную часть электрода удаляют. Длина факела дежурной дуги поддерживается в пределах 5—8 мм. При сварке поверхность электрода устанавливают перпендикулярно к оси канала плазмформирующего сопла. Плазмотрон располагают к изделию под углом 80—90° относительно вертикальной оси. Угол между плазмотроном и присадочной проволокой 90—100°. Нарастание тока с минимального значения производится в течение 15—20 с. При нарушении формирования шва (появления морщинистой поверхности) уменьшают длину дуги или увеличивают скорость сварки. Появление загрязнений на поверхности шва, сопро-

Режимы сварки плазменной дугой стыковых соединений алюминия

Форма подготовки кромок, характер выполненного шва	Толщина металла, мм	Диаметр отверстия плазмозащитного сопла, мм	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Диаметр присадочной проволоки, мм	Расход защитного аргона, л/мин (расход плазмобразующего аргона 1,2—2 л/мин)	Скорость сварки, м/ч	Число проходов
Без скоса кромок, односторонний, на съёмной подкладке	4	6,0	100—140	38—42	2	6—8	10—12	1
	8	7,5	170—290	38—42	3	10—14	5—6,5	2
	12	7,5	280—340	38—42	3	10—14	5—6,5	2
Без скоса кромок, двусторонний	4	6,0	90—120	38—42	2	6—8	11—12	2
	12	7,5	280—340	38—42	3	10—14	6—6,5	2
Со скосом двух кромок (угол 70°, притупление 1—3 мм), односторонний, на съёмной подкладке	12	8,5	320—390	40—45	3	12—16	5—6	3
	16	9,5	360—400	40—45	3	12—16	5—6	4
	20	9,5	350—400	40—45	3	12—16	5—6	4
С двумя симметричными прямыми скосами двух кромок (угол 70°, притупление 2—4 мм)	16	9,5	330—400	40—45	3	12—16	5—5,5	6
	20	9,5	330—400	40—45	3	12—16	5—5,5	6
	30	10,5	330—400	40—45	3	12—16	5—5,5	8

Примечание. Расстояние между соплом и изделием при сварке без скоса кромок 12—16 мм, при сварке со скосом кромок 16—22 мм.

вождаемых повышением напряжения дуги, свидетельствует о загрязнении плазмотрона. Поверхность сопла очищают от сажи, брызг и металлического конденсата.

Однопроходная сварка изделий малых толщин предусматривает проплавление кромок на всю толщину и формирование усиления с обратной стороны шва. Двустороннюю сварку стыковых соединений выполняют на подкладке, причем после сварки с одной стороны корень шва удаляют, место сварки зачищают механическим способом, обезжиривают и сваривают с обратной стороны. При двухслойной сварке стыковых соединений допускается первый проход выполнять путем проплавления свариваемых кромок без подачи присадочной проволоки.

Для плазменной сварки алюминия на постоянном токе обратной полярности рекомендуется применять установки УПС 501У4 (токи до 500 А) и УПС 801У3 (токи до 800 А). Эти установки состоят из механизма перемещения плазмотрона, сварочного выпрямителя ВПС 501 или ВПС 801 блока управления и плазмотрона ГПР501 и ГПР502.

Можно применять сборные посты, укомплектованные выпрямителями ИПН 160/600, ВДУ 504 и аппаратурой управления АУПС-В, сварочной головкой ГСУ-7 или автоматами АРК, АДСВ5, АСТВ-2М. Для сварки и управления циклом сварки могут быть применены модернизированные шкафы управления для серийных установок УПУ-3М, УПР-3, АПР402у4 и др.

Микроплазменная сварка (рис. 19). Алюминий и его сплавы сваривают асимметричным синусоидальным током промышленной частоты или разнопольярными прямоугольными импульсами регулируемой частоты (табл. 27, 28). Амплитуда импульсов тока прямой полярности, как правило, в 2—3 раза выше амплитуды импульсов тока обратной полярности.

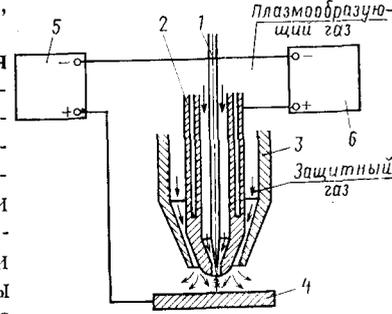


Рис. 19. Схема микроплазменной сварки:

1 — вольфрамовый электрод; 2 — медное водоохлаждаемое сопло; 3 — керамическое сопло; 4 — изделие; 5 — источник питания микроплазмы; 6 — источник питания дежурной дуги

Таблица 27

Ориентировочные режимы микроплазменной сварки алюминия и его сплавов переменным током промышленной частоты

Марка сплава	Толщина металла, мм	Среднее значение тока, А		Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч	Диаметр вольфрамового электрода, мм	Расход газа, л/мин	
		прямого $I_{пр.ср}$	обратного $I_{обр.ср}$				Аргон	Гелий
АД0	0,3	12—15	8—10	16—18	25—30	1,0	0,15—0,2	2—3
АМг6		8—10	6—8					
АД0	0,5	22—26	16—18	20—22	22—26	1,0—1,5	0,2—0,25	2—3
АМг6		16—18	10—12					
АД0	1,0	30—46	22—25	22—24	20—24	1,0—1,5	0,25—0,3	3—4
АМг6		30—34	18—22					
АД0	1,5	50—60	25—30	22—24	18—24	1,5—2,0	0,3—0,35	4—5
АМг6		40—50	20—25					

Примечания: 1. При ручной микроплазменной сварке скорость сварки снижается до 8—15 м/ч с одновременным уменьшением сварочного тока.
2. Для $I_{пр.ср}$ и $I_{обр.ср}$ приведены средние значения, измеряемые магнитно-электрическими приборами.

Таблица 28

Ориентировочные режимы микроплазменной сварки алюминия и сплава АМг6 разнополярными прямоугольными импульсами

Источник питания	Марка сплава	Толщина металла, мм	Среднее значение тока, А	
			$I_{пр}$	$I_{обр}$
МПУ-РИ	АД0	0,3	10—12	8—10
	АД0		20—25	15—20
МПУ-5	АД0	1,0	40—50	18—20
	АМг6		35—40	16—18
	АД0	1,5	70—80	25—30
	АМг6		60—70	20—25
	АД0	2,0	110—130	30—40
	АМг6		90—110	30—35

Продолжение таблицы 28

Источник питания	Марка сплава	Длительность импульса полярности, с		Скорость сварки, м/ч	Диаметр вольфрамового электрода, мм	Расход газа, л/мин	
		прямой $\tau_{пр}$	обратной $\tau_{обр}$			Аргон	Гелий
МПУ-РИ	АД0	0,02	0,04	25—30	1,0	0,15—0,2	2—3
	АД0	0,03	0,03	25—30	1,0	0,2—0,25	2—3
МПУ-5	АД0	0,04	0,04	20—25	1,0	0,25—0,3	3—4
	АМг6			20—25	1,5	0,3—0,35	3—4
	АД0	0,08	0,08	15—20	1,5	0,35—0,4	4—5
	АМг6			15—20	2,0		

Примечание. Для $I_{пр}$ и $I_{обр}$ приведены амплитудные значения, измеренные на осциллограммах тока.

Необходимое условие устойчивого процесса микроплазменной сварки — существование малоамперной (1—5 А) дежурной дуги постоянного тока, горящей непрерывно между соплом и вольфрамовым электродом.

По сравнению с аргонодуговой сваркой микроплазменный способ обеспечивает более устойчивое горение дуги на малых токах, меньшую ширину швов, большую глубину проплавления и более узкую зону термического влияния. Благодаря этому повышаются механические свойства сварных соединений и снижаются деформации свариваемых изделий. С помощью микроплазменной сварки можно выполнять стыковые, отбортованные и угловые соединения металла толщиной 0,2—2 мм. Разделка кромок для всех типов соединений не требуется. Для металла толщиной 0,2—0,5 мм более стабильное качество стыковых соединений достигается применением присадочной проволоки. Металл толщиной 0,6—2 мм можно сваривать встык как с использованием присадочной проволоки, так и без нее.

Стыковые соединения сваривают на технологической подкладке из коррозионно-стойкой стали с канавкой прямоугольного или овального сечения для формирования обратной стороны шва. Глубина канавки 0,4—1 мм, ширина 2—5 мм. Угловые соединения с толщиной сте-

нок менее 0,5 мм собирают на прихватках и выполняют на технологических подкладках с применением присадочной проволоки или без нее. При толщине стенок более 0,5 мм применение присадочной проволоки не обязательно. Тавровые соединения микроплазменной сваркой выполнять не рекомендуется.

Для микроплазменной сварки изделий необходимы приспособления, обеспечивающие плотную подгонку свариваемых кромок. При ручной сварке наклон горелки к изделию составляет 60—80° (сварка углом вперед), а при автоматической 80—90°. Угол между присадочной проволокой и вольфрамовым электродом в процессе сварки следует сохранять равным 90°. Ручную сварку выполняют левым способом.

В качестве плазмообразующего газа используют аргон, а защитного — гелий. Гелий, защищая сварочную ванну от атмосферы, затрудняет развитие фронта ионизации в радиальном направлении и, дополнительно сжимая дугу, делает ее пространственно устойчивой. Дежурная дуга возбуждается с помощью осциллятора при обязательной подаче плазмообразующего газа. Факел дежурной дуги должен иметь форму конуса длиной 6—10 мм. В процессе сварки видимую часть длины дуги необходимо поддерживать в пределах 3—5 мм.

Для предотвращения образования трещин в кратере шва при ручной микроплазменной сварке заканчивать шов необходимо с интенсивной подачей в сварочную ванну присадочной проволоки и плавным увеличением дугового промежутка. При автоматической сварке используются специальные устройства для заварки кратера. После обрыва дуги подачу защитного газа следует прекращать по истечении 5—10 с.

В качестве источников питания для ручной и автоматической микроплазменной сварки алюминия и его сплавов используют аппараты асимметричного переменного тока А1281У, а для автоматической сварки разнополярными прямоугольными импульсами — аппараты МПУ-РИ, МПУ4 и МПУ5. При ручной и автоматической сварке применяют соответственно горелки ОБ1160А и ОБ1213, для механизированной сварки — автоматы микроплазменной сварки А1342, а также другие серийно изготавливаемые головки для аргонодуговой сварки, которые обеспечивают стабильное и точное перемещение горелки по линии сварки.

ВЫБОР СПОСОБА СВАРКИ И СВОЙСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

При выборе оптимального способа сварки следует учитывать ряд требований: качество шва, его внешний вид, производительность и другие экономические стороны процесса, его универсальность, деформацию изделия, местные условия.

Аргонодуговая сварка неплавящимся электродом наиболее универсальна и оперативна, т. е. сварка возможна в различных пространственных положениях и стесненных условиях. В последние годы освоен еще один универсальный способ — импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом.

Наилучшее формирование шва достигается при сварке неплавящимся электродом. К указанному процессу приближается сварка плавящимся электродом, особенно автоматическая в смеси аргона и гелия. Значительно худший шов дает дуговая сварка покрытыми и угольными электродами. В ряде случаев поверхность таких швов приходится выравнивать механическим путем. Деформация изделий, наибольшая при ручной аргонодуговой сварке неплавящимся электродом, несколько меньше при ручной сварке угольными или покрытыми электродами. Местный предварительный подогрев в большинстве случаев увеличивает остаточные деформации. Наименьшую деформацию обеспечивают однопроходная сварка плавящимся электродом и сварка неплавящимся электродом постоянным током в гелии.

Пористость и механические свойства металла шва зависят от способа, режима и техники сварки, которые определяют погонную энергию и степень защиты жидкой ванны от воздуха, влаги, загрязнений. Насыщенность газами практически наименьшая при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом. Это положительно сказывается на механических свойствах. При сварке плавящимся электродом пустот в шве больше, чем при сварке неплавящимся, так как поры не только зарождаются в ванне, но и развиваются из парогазовых пузырьков, поступающих с каплями электродного металла.

Способ сварки оказывает наибольшее влияние на механические свойства соединений высоколегированных алюминий-магниевого и термообработываемых спла-

сплавления, который в значительной степени зависит от способа сварки и составляет 0,7—1. Обычно сварка металла малых и средних толщин неплавящимся электродом обеспечивает несколько более высокую прочность соединений, чем сварка плавящимся электродом.

Пластичность и вязкость сварных соединений технического алюминия и сплава АМц высокие (угол изгиба $\alpha=180^\circ$, $a_H \geq 20$ Дж/см²). С повышением содержания магния в Al—Mg-сплавах пластичность и вязкость соединений уменьшаются (сплав АМг6, $\alpha=20 \div 100^\circ$, $a_H=15 \div 20$ Дж/см²). Сплав АМгЗ содержит повышенное количество кремния и поэтому, несмотря на более низкое, чем в сплаве АМг6, содержание магния его сварные соединения отличаются пониженной пластичностью и вязкостью.

Значительно больше проблем возникает в случае необходимости получения сварных соединений, близких по механическим свойствам к основному металлу, на термически упрочняемых сплавах. В процессе сварки металл зоны сплавления и околошовной зоны подвергается термообработке: закалке, отжигу, возврату.

На рис. 11 показаны результаты измерения конечных значений твердости в сварном соединении сплавов систем Al—Mg—Si, Al—Cu—Mn и Al—Zn—Mg. Выявляются преимущества дисперсно твердеющего при комнатной температуре сплава с цинком и магнием перед двумя другими сплавами. В зависимости от температуры и продолжительности ее воздействия степень разупрочнения различна. Показатели прочности сварных соединений сплавов системы Al—Mg—Si составляют 60—80%, а системы Al—Cu—Mn — 50—70%. Существенное восстановление прочности соединений (90—95% уровня основного металла) для сплавов указанных систем легирования можно достичь только повторной закалкой всего соединения и искусственным старением. Однако подобная термообработка всего сварного узла или конструкции возможна далеко не всегда, так как такую операцию трудно выполнить на крупногабаритной конструкции, а также на любой конструкции, имеющей жесткие заданные размеры.

Если для сплавов системы Al—Mg—Si в целях снижения склонности сварных швов к образованию трещин приходится применять сварочную проволоку, отличающуюся

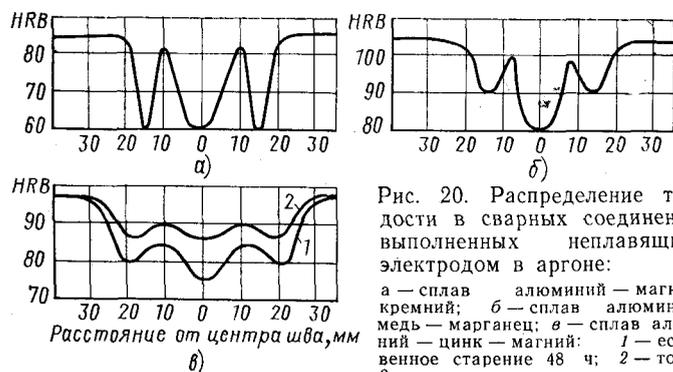


Рис. 20. Распределение твердости в сварных соединениях, выполненных неплавящимся электродом в аргоне:
а — сплав алюминий — магний — кремний; б — сплав алюминий — медь — марганец; в — сплав алюминий — цинк — магний: 1 — естественное старение 48 ч; 2 — то же 3 мес.

щуюся по химическому составу от основного металла (например, СВАК5), получить металл шва после термообработки полностью равнопрочный с основным металлом не удастся.

Самозакаливающиеся сплавы системы Al—Zn—Mg после сварки достигают нормальной прочности в сварном соединении примерно через три месяца естественного старения (рис. 20). После сварки такие сплавы можно также старить искусственно. В этом случае прочность сварных соединений практически равна прочности основного металла.

Некоторого уменьшения степени разупрочнения металла в околошовной зоне можно добиться, корректируя технологический процесс получения сварного соединения путем увеличения концентрации ввода теплоты, высокой скорости охлаждения. Так, при однопроводной сварке соединений сплава 1201 толщиной 6 мм ширина зоны термического влияния составляет 28—30 мм для автоматической сварки вольфрамовым электродом постоянным током прямой полярности в гелии и 45 мм для автоматической сварки вольфрамовым электродом переменным током в аргоне. При сварке сплава толщиной 14 мм ширина зоны соответственно составляет 40—50 и 65—70 мм. Улучшения свойств исходного материала — прочности, вязкости, пластичности, свариваемости — можно достичь ограничением содержания сопутствующих примесей, в частности железа и кремния, введением циркония в качестве модификатора. За счет снижения содержания примесей создается запас пластичнос-

ти, благодаря чему можно применять более высокую степень нагартовки.

Листовые полуфабрикаты из сплава АМг6 с ограниченным содержанием примесей железа и кремния до 0,01—0,02% каждого элемента как в отожженном, так и в нагартованном состоянии имеют более высокую пластичность (на 20—30%) и ударную вязкость (на 40—50%), чем сплавы обычного состава.

Сварные соединения нагартованных листов из сплавов высокой чистоты имеют временное сопротивление разрыву на 40—70 МПа, ударную вязкость в 1,5—2 раза, угол изгиба в 2,5 раза выше соответствующих значений для серийного сплава.

Обжатие (нагартовка) сварных швов и околошовной зоны при продольной прокатке роликами увеличивает прочность соединений. Так, обжатие сварных швов нагартованного сплава АМг6 повышенной чистоты приводит к росту временного сопротивления разрыву на 30—50 МПа, условного предела текучести на 100—120 МПа. При испытании на разрыв образцов сварных соединений до прокатки разрушение происходит, как правило, в зоне сплавления, а после прокатки — преимущественно в зоне отжига. Прочность соединений во втором случае выше. В табл. 29 приведены типичные значения механических свойств стыковых соединений, выполненных аргонодуговой сваркой на металле толщиной 10 мм.

Сравнительно высокая **коррозионная стойкость** алюминия и ряда его мало- и среднелегированных сплавов определяется свойством легко пассивироваться. На воздухе при нормальной температуре на поверхности алюминия образуется устойчивая окисная пленка, предотвращающая дальнейшее разрушение металла. Конечная толщина этой пленки 5—20 нм. На алюминиевых сплавах в зависимости от окружающей среды, химического состава, структуры металла наблюдаются следующие виды коррозии: общая, межкристаллитная, коррозия под напряжением (коррозионное растрескивание), расслаивающаяся коррозия, контактная и др.

Металл шва на алюминии и его сплавах подвержен тем же видам коррозии, что и основной металл, однако возможность появления коррозии на литом металле обычно вероятнее и скорость разрушения в агрессивных продуктах выше, чем у основного — деформированного металла. Коррозионная стойкость сварных соеди-

Механические свойства основного металла и сварных соединений алюминиевых сплавов

Сплав	Основной металл			σ _с сварных соединений, МПа
	σ _т , МПа	σ _{0,2} , МПа	δ, %	
А99М	50	20	60	45—50
АД0М	70—80	25—30	30—35	65—80
АМцМ	120—130	30—50	24—26	120—130
АМг2М	175—195	80—100	21—23	175—195
АМг3М	185—225	80—120	20—22	185—215
АМг4М	265—275	140—150	21—23	205—245
АМг5М	275—295	170—180	18—20	255—295
АМг6М	315—335	160—170	18—20	295—335
АД31Т1	235	195	10	135—235*
АД33Т1	315	265	12	185—315**
1915Т1	355—375	255—275	11—12	315—335**
1201Т1	390—410	315—325	10—11	255—315*
1201Т1Н	430—450	345—365	8—10	295—315*

* Максимальные значения при искусственном старении после сварки.

** То же после трех месяцев естественного старения.

нений в присутствии электролита (пленки, влаги и др.) определяется как общий результат деятельности макро- и микрогальванических пар. Макрогальванический элемент состоит по крайней мере из трех частей: основного металла, околошовной зоны и шва. Эти элементы могут отличаться химическим составом, распределением и соотношением анодных и катодных участков, а также распределением напряжений. Шов менее плотный, а окисная пленка на нем более рыхлая, чем на основном металле. В шве могут иметь место дефекты сварки: поры, неметаллические включения.

На каждом макрогальваническом элементе сварного соединения протекают коррозионные процессы за счет работы многоэлектродной микрогальванической системы.

Определенное влияние на коррозионную стойкость сварного соединения оказывает и способ сварки. Из условий эксплуатации для емкостной аппаратуры наиболее предпочтительны стыковые соединения. Нахлесточные и отбортованные соединения в корпусе емкости при-

менять не рекомендуется во избежание накопления агрессивного продукта в зазорах или перед бортом. Допускается лишь приварка опор и других элементов с наружной стороны емкости. С этой же точки зрения угловые соединения внутри оборудования не должны иметь зазоров, т. е. не следует применять швы прерывистые, незащищенные со стороны корня. Не рекомендуются и односторонние швы с неполным проваром.

Наружную сторону шва при сварке обычно располагают со стороны агрессивной жидкости. Если узлы или изделие в целом сваривают односторонними швами на съемной подкладке и корень шва находится со стороны продукта, то окись и загрязнения в корне шва следует удалять механическим путем.

Наиболее высокое качество соединений обеспечивают автоматическая и ручная сварка неплавящимся электродом, а минимальную коррозионную стойкость — ручная сварка покрытыми электродами.

Технический алюминий различных марок, сплавы АМц и Д12 относятся к группе сравнительно стойких сплавов. Однако при использовании технического алюминия АД00, АД0 в оборудовании для получения азотной кислоты швы разрушаются из-за межкристаллитной и язвенной коррозии. Отжиг (гомогенизация) соединений при 550 °С в течение 2—4 ч подавляет межкристаллитную и язвенную коррозии. Применение для указанного оборудования алюминия высокой чистоты (А95—А995) значительно повышает срок его службы, причем термообработка сварных соединений не требуется. Оборудование для хранения и перевозки холодной концентрированной азотной кислоты, изготовленное из алюминия АД0, АД1, также не требует термообработки.

Сварные соединения сплавов с содержанием до 3,5% Mg (АМг1, АМг2, АМг3) не проявляют чувствительности к межкристаллитной, расслаивающей коррозии и коррозионному растрескиванию. Сплавы с содержанием более 3,5% Mg (АМг4) и особенно более 5% Mg (АМг5, АМг6) в определенном структурном состоянии, когда по границам зерен в швах (или основном металле) выделяется сплошная пленка вторичной фазы Al_3Mg_2 (β-фаза), при определенных условиях внешней среды могут быть чувствительны к указанным видам коррозии.

Сопутствующий и предварительный подогрев при сварке приводит к уменьшению скорости кристаллиза-

ции металла шва и способствует выделению вторичных фаз по границам зерен. Термообработка после сварки приводит к нарушению непрерывности выделений фаз, снижает напряжения. В этой связи подогрев при сварке сплавов с магнием не должен превышать 100 °С, особенно это касается сплавов АМг5 и АМг6.

Как правило, после сварки стойкость к коррозионному растрескиванию мало зависит от технологии изготовления полуфабрикатов. Температура отжига 250 °С после сварки (при медленном нагреве) значительно повышает сопротивление коррозионному растрескиванию сплавов АМг5 и АМг6. Для сварных соединений большого сечения высокотемпературный отжиг при температуре 450—470 °С также повышает сопротивление соединению растрескиванию.

Сплавы системы Al—Mg—Si (АД31, АД33, АД35, АВ) обладают достаточно хорошим сопротивлением общей коррозии и практически не чувствительны к коррозионному растрескиванию. Наилучшую коррозионную стойкость имеют сплавы АД31 и АД35. Коррозионная стойкость естественно состаренных сплавов этой группы такая же, как у сплавов АМг3, АМг4. У искусственно состаренных полуфабрикатов скорость коррозии выше, появляется склонность к межкристаллитной коррозии. Коррозионная стойкость сварных соединений максимальна у сплавов, прошедших закалку и искусственное старение до сварки и такую же термообработку после сварки.

Внешний вид сварных соединений сплавов системы Al—Mg—Si, выполненных с помощью присадочной проволоки СвАК5, после цветного анодирования ухудшается. Сварной шов имеет темный оттенок. Поэтому для декоративных целей следует применять проволоку Св1557.

Свариваемые сплавы системы Al—Zn—Mg (1915, 1911) при определенных условиях склонны к коррозионному растрескиванию и расслаивающей коррозии. Сплав 1935 нечувствителен к коррозионному растрескиванию, однако обладает пониженным сопротивлением расслаивающей коррозии. Оптимальная коррозионная стойкость сварных соединений рассматриваемых сплавов достигается при условии применения присадочной проволоки Св1557 и ступенчатых режимов искусственного старения после сварки: 100 °С, 10—20 ч + 175 °С, 4—6 ч.

Предпочтительно свариваемые полуфабрикаты использовать также в искусственно состаренном состоянии.

Сплавы системы Al—Cu—Mg (1201) имеют пониженную общую коррозионную стойкость. В сварных образцах сплава 1201 растрескивание наблюдается, как правило, в зоне сплавления. Искусственное старение (160 °C) сварных соединений в 2—3 раза повышает коррозионную стойкость образцов по сравнению с коррозионной стойкостью образцов в состоянии после сварки. Последующие нагревы при 70—100 °C также увеличивают время до разрушения образцов.

ТРЕЩИНЫ И ПОРЫ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ. ОСНОВНЫЕ МЕТОДЫ ИХ ПРЕДОТВРАЩЕНИЯ

Трещины. Распространенный и весьма опасный дефект сварных соединений алюминия и его сплавов — трещины — нарушает герметичность соединений уменьшает их прочность и коррозионную стойкость. Кроме того, способствуя высокой концентрации напряжений, трещины под действием эксплуатационных нагрузок увеличивают свои размеры и могут стать причиной хрупкого разрушения. В связи с этим наличие в несущих элементах сварных конструкций трещин не допускается, а все обнаруженные в них трещины обязательно устраняют повторной сваркой. Трещины образуются под действием растягивающих деформаций в металле, обладающем пониженной пластичностью. В зависимости от температуры образования трещины относят к горячим или холодным. Горячие трещины чаще всего появляются в кристаллизующемся металле шва и зоны сплавления, который обладает аномально низкой пластичностью ($\delta = 0,2 \div 0,5\%$). Такие горячие трещины иногда называют кристаллизационными. Низкие значения относительного удлинения металла в процессе кристаллизации обусловлены охрупчивающим действием на сросшиеся границы зерен остатков жидкого металла.

Температурный интервал, характеризующий процесс кристаллизации с момента смыкания растущих кристаллов и образования ими жесткого каркаса до затвер-

девания последней порции расплавленного металла, называют эффективным интервалом кристаллизации. Чем шире эффективный интервал кристаллизации, тем больше вероятность появления в нем растягивающих деформаций, а следовательно, и горячих трещин. Верхняя граница эффективного интервала кристаллизации наблюдается визуально в виде края сварочной ванны, тогда как нижнюю его границу можно определить лишь специальными термографическими методами или механическими испытаниями. Температурный интервал образования горячих трещин, определенный с помощью механических испытаний, получил название температурного интервала хрупкости. Наличие температурного интервала хрупкости свойственно всем применяемым в сварных конструкциях маркам алюминия и алюминиевых сплавов; трещины образуются только при появлении в температурном интервале хрупкости растягивающих деформаций. Вероятность появления растягивающих деформаций повышается с увеличением температурного интервала хрупкости.

Чистые металлы и эвтектические сплавы не имеют эффективного интервала кристаллизации: они затвердевают практически при постоянной температуре. Однако горячие трещины образуются при сварке и этих материалов. Основной причиной их охрупчивания является локализация деформации в результате концентрации растягивающих напряжений по структурно несовершенным границам зерен. Экспериментальные трудности определения нижней границы температурного интервала хрупкости и деформаций металла в процессе его кристаллизации при сварке затрудняют расчетное определение возможности появления горячих трещин в реальных сварных соединениях. Для практической оценки склонности сварных соединений к образованию горячих трещин обычно используют результаты сравнительных испытаний, полученные при сварке специальных технологических образцов, которые изготовлены из материала свариваемой конструкции и имитируют ее соединения. Установленные для каждого такого образца размеры и технология сварки обеспечивают соединению условия, необходимые для образования горячих трещин. Стойкость сварных соединений алюминия и его сплавов против образования горячих трещин чаще всего определяют по результатам сварки технологических образцов

«рыбий скелет», а также крестообразных нахлесточных образцов, которые имитируют соответственно стыковые и угловые (нахлесточные) соединения.

За показатель трещинообразования при сварке упругих образцов принимают отношение суммарной длины пораженных трещинами участков шва и зоны сплавления к общей длине соединения. Показатель склонности сварных соединений к образованию горячих трещин определяют отдельно для каждого сочетания свариваемый металл—проволока и рассчитывают по формуле

$$A_{cp} = \frac{100}{Ln} \sum_{i=1}^n l_i,$$

где A_{cp} — показатель склонности сварного соединения к образованию трещин, %; l_i — длина участков шва и зоны сплавления с трещинами для каждого испытанного образца; L — длина швов в образце; n — число испытанных образцов.

Трещины в соединениях обнаруживают с помощью восьмикратной лупы, а границы пораженных трещинами участков определяют с точностью до миллиметра.

Образцы «рыбий скелет» изготовляют из листового металла толщиной 2—6 мм в соответствии с размерами, указанными на рис. 21. При испытании состава сварочных проволок для повышения чувствительности используют образцы «рыбий скелет» с канавкой, которая увеличивает долю присадочного металла в металле шва до 40%. Испытуемый образец укладывают на плоскую под-

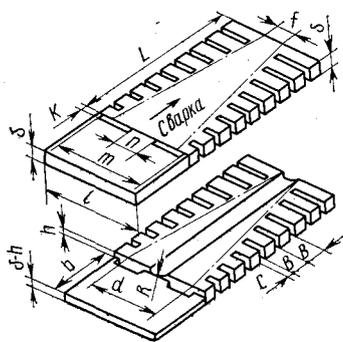


Рис. 21. Размеры образца и вводной планки для пробы «рыбий скелет»

δ	L	l	d	f	B
2,0	83,0	50	41	4	9,4
2,5	95,6	57	48	5	10,8
3,0	108,2	64	53	6	12,2
4,0	131	78	64	7	15
4,5	142,4	84	69	8	16
5,0	154	92	74	8	17,4
6,0	178	105	85	9	20

C	h	R	b	m	n	k
1,6	1,0	3,0	30	44	20	1,0
1,6	1,2	3,2	35	51	22	1,0
1,6	1,5	3,5	40	58	24	1,0
1,6	2,0	4,0	44	72	26	1,0
1,6	2,2	4,3	45	78	26	1,0
1,8	2,6	4,5	47	86	27	1,0
2,0	3,0	5,0	50	98	28	1,0

кладку из меди или графита и проплавляют вдоль осевой линии автоматической аргонодуговой сваркой вольфрамовым электродом симметричным переменным током на постоянной скорости $v_{св} = 12$ м/ч. При этом выбранный режим сварки должен обеспечивать такой же, как в реальных соединениях проплав и равномерную по всей длине образца ширину шва с лицевой и обратной стороны. Для стабилизации вводимой в образец теплоты, сварочную дугу возбуждают на вводной планке, которую приставляют изолирующими выемками к образцу со стороны меньших надрезов. При переходе дуги с вводной планки на образец выступ расплавляется, а образовавшийся при этом воздушный зазор прекращает теплообмен между планкой и образцом. Каждое испытываемое сочетание: свариваемый металл — проволока оценивают по результатам испытания не менее семи образцов. Перед сваркой каждого последующего образца подкладка охлаждается до комнатной температуры.

Для оценки склонности соединений к образованию горячих трещин при сварке разноименных алюминиевых сплавов используют образцы «рыбий скелет», вырезанные из стыковых соединений этих сплавов, которые сваривают с двух сторон без присадочной проволоки. При этом применяют те же режимы, что и при испытании опытных образцов, но используют повышенную скорость сварки ($v_{св} = 30$ м/ч). Изготовленный из такого соединения образец «рыбий скелет» проплавляют вдоль имеющегося шва на режимах, применяемых при сварке обычных образцов.

Крестообразный нахлесточный образец (рис. 22) собирают и сваривают из двух пластин размерами $300 \times 100 \times 2-3$ мм. Пластины соединяют нахлесточными швами ручной аргонодуговой сваркой вольфрамовым электродом в направлении стрелок и в последовательности, указанной стоящими над ними цифрами. Сварку выполняют на типичном для данной толщины пластин режиме, который обеспечивает полное и равномерное проплавление нижней пластины. Чтобы уменьшить деформации соединяемых пластин, их сваривают в прижатом струбцинами состоянии, прихватывают точечной контактной сваркой или стягивают болтом. Отсутствие методических указаний о величине усилия прижима, числе сварных точек, месте их расположения и режимах сварки, а также прису-

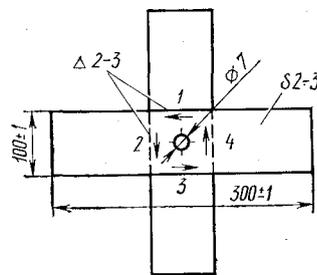


Рис. 22. Размеры образца и схема сварки крестообразной нахлесточной пробы

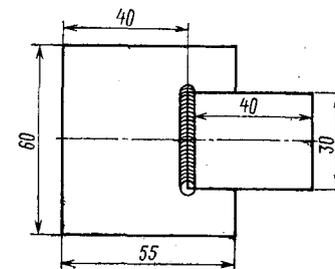


Рис. 23. Размеры образца при испытании по методике МВТУ

щий ручной сварке элемент субъективности ухудшают воспроизводимость показателя трещинообразования, полученного при сварке крестообразных нахлесточных образцов.

Некоторые исследователи иногда применяют крестообразный угловой или тавровый образец. Существенный недостаток такого образца — низкая чувствительность к образованию трещин. В связи с этим его редко применяют для научных исследований, когда необходимо разделить по показателю трещинообразования все испытываемые сплавы. Однако тавровый образец можно применять для практических целей, так как он дает возможность определить с достаточной достоверностью, будут ли появляться трещины при сварке угловых швов в аналогичных соединениях реальных конструкций или нет.

Для оценки склонности к трещинообразованию также используют образцы, принудительно деформируемые в процессе сварки. Типичным примером таких испытаний является проба МВТУ (рис. 23), при сварке которой соединяемые элементы растягивают с заданной скоростью. Скорость растяжения увеличивают от образца к образцу до тех пор, пока в металле шва или зоне сплавления не образуется трещина. В качестве показателя трещинообразования принята минимальная скорость зажимных губок растягивающей машины, обеспечивающая появление трещины. Определяемая таким способом критическая скорость деформации не совпадает с реальными деформациями металла шва и зоны сплавления в процессе образования горячих трещин, что затрудняет применение результатов испытаний при сварке реальных соединений.

Практическая ценность показателей трещинообразования, полученных с помощью других специальных образцов, также определяется тем, насколько условия их сварки соответствуют условиям сварки реальных соединений. Незменность конструктивной формы, постоянство способов и режимов сварки образцов лишают возможности оценить влияние этих параметров на трещинообразование, однако они позволяют выбрать состав основного металла и проволоки, который обладает повышенной стойкостью против горячих трещин при сварке аналогичных соединений.

Влияние отдельных химических элементов на образование горячих трещин в металле шва или зоне сплавления определяется их участием в образовании карбаса растущих кристаллов на краю сварочной ванны и легкоплавких эвтектик по границам зерен. Чем ниже температура кристаллизации этих эвтектик по отношению к температуре края сварочной ванны, тем меньшей стойкостью против трещин обладает данное соединение. На температуру края сварочной ванны в основном влияет система легирования, а температуру легкоплавких эвтектик определяют элементы примеси. Стойкость сварных соединений против образования горячих трещин имеет сложную зависимость от состава сплавов. Введение в алюминий легирующих элементов сначала увеличивает, а затем уменьшает показатель трещинообразо-

вания. Положение максимума трещинообразования зависит от системы легирования и условий кристаллизации металла сварочной ванны. Увеличение скорости кристаллизации, а также введение в алюминиевые сплавы модифицирующих элементов уменьшают максимум трещинообразования при сварке по величине и смещают его в сторону менее легированных сплавов. Зависимости показателя трещинообразования от состава для наиболее распространенных систем легирования представлены на рис. 24—27.

При сварке технического алюминия образование горячих трещин зависит в основном от содержания железа и кремния. Оба эти элемента обычно попадают в алюминий при электролизе и последующем переделе из футеровки печей и шихтовых материалов. Сварка образцов «рыбий скелет», изготовленных из технического алюминия, плавки которого содержали различные количества железа и кремния, показала сложное влияние этих элементов на показатель трещинообразования (рис. 24). При малых содержаниях железа наиболее склонны к образованию трещин сплавы с 0,35—0,5% Si. В низкокремнистом алюминии увеличение содержания железа практически не изменяет показатель трещинообразования. Наличие в алюминии обоих элементов — железа и кремния — смещает максимум трещинообразования в сторону сплавов, имеющих в своем составе 0,1% Fe и 0,2—0,3% Si.

Из приведенных на рис. 24 показателей трещинообразования видно, что при сварке сплавов типа АД00 с суммарным содержанием железа и кремния 0,15—0,25% существенное снижение показателя трещинообразования достигается при содержании железа больше, чем кремния в 3 раза и более. Для алюминия, имеющего суммарное содержание железа и кремния больше 0,3%, для существенного повышения стойкости соединений против трещин уже достаточно двукратного превышения железа над кремнием. Установленный характер изменения показателя трещинообразования связан с распределением легкоплавких структурных составляющих по границам зерен литого металла шва. Повышение содержания железа и кремния в сплаве измельчает структуру металла, увеличивая одновременно объем легкоплавких фаз по границам зерен. Максимальная горячеломкость, которая наблюдается при сварке алюминия АД00, связана с не-

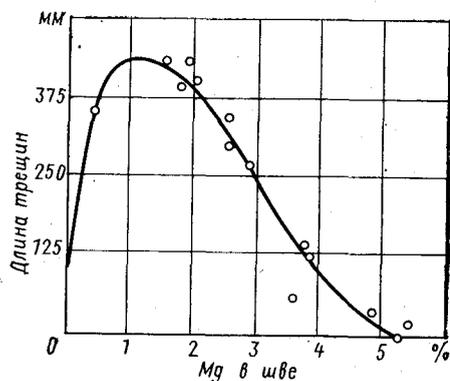


Рис. 26. Склонность к образованию трещин сплавов системы Al—Mg при полуавтоматической сварке плавящимся электродом тавровых образцов

соединений к горячим трещинам уменьшается в результате образования интерметаллида Mg_2Si . К сожалению, наличие этого интерметаллида в металле шва одновременно ухудшает его пластичность и коррозионную стойкость. Соединения высоколегированных алюминиевых сплавов АМг6 мало склонны к образованию горячих трещин. Однако в нетехнологичных конструкциях соединений возможно появление трещин при сварке даже этого высоколегированного сплава. Если изменить конструкцию таких соединений не представляется возможным, то для сварных конструкций целесообразно использовать сплав АМг6, который имеет пониженное (до 0,1—0,15%) суммарное содержание железа и кремния и отношение железа к кремнию больше единицы. При сварке таких сплавов проволокой СвАМг63 объем выделившихся по границам зерен легкоплавких эвтектик уменьшается.

Склонность сплавов системы Al—Zn—Mg к образованию трещин при сварке определяется в основном суммарным содержанием и соотношением основных легирующих элементов (рис. 27). При любом содержании магния дополнительное введение в сплав цинка ухудшает стойкость сварных соединений против трещин в результате образования легкоплавких эвтектик на основе $MgZn_2$. При этом чем больше отношение цинка к магнию в сплаве, тем выше его показатель трещинообразования при сварке. Наиболее используемые в промышленности сплавы этой системы — 1915 и 1935 — обладают

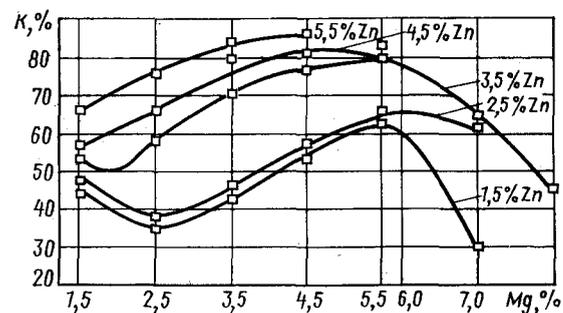


Рис. 27. Склонность к образованию трещин K (%) сплавов системы Al—Zn—Mg при сварке крестообразных нахлесточных образцов

повышенной склонностью к образованию горячих трещин, поэтому их сваривают проволокой типа Св1557, которая содержит 4,5—5,5% Mg. Применение проволоки Св1557 уменьшает отношение цинка к магнию в металле шва, повышая, таким образом, его стойкость против трещин. Повышенную стойкость сплавов типа 1915 против горячих трещин обеспечивает и проволока СвАК5, однако работоспособность соединений, сваренных этой проволокой, изучена недостаточно.

Холодные трещины образуются при температурах ниже $250^\circ C$ в результате концентрации растягивающих напряжений на малопластичных участках металла шва и зоны сплавления. Наиболее склонны к образованию холодных трещин высоколегированные алюминиевые сплавы, сварные соединения которых значительно уступают по прочности подвергнутому термомеханической обработке основному металлу, а границы зерен литого металла шва и зоны сплавления имеют практически сплошную сетку малопластичных выделений избыточных фаз. Особенно велика опасность появления холодных трещин в случае расположения таких соединений в углах и уменьшенных сечениях, когда существующая структурная микро- и макроконцентрация напряжений усугубляется неблагоприятной конструкцией соединения. Часто причиной появления холодных трещин служит ударная правка и рихтовка пространственных элементов, экспандирование обечаек и другие технологические операции, которые способствуют концентрации пластических деформаций в менее пластичном металле шва и зоны сплавления.

Чтобы предупредить образование холодных трещин, следует швы располагать вдали от конструктивных концентраторов напряжений, а также применять сварочную оснастку и технологию, обеспечивающую требуемые размеры конструкции без силовой обработки их после сварки. Для высоколегированных сплавов системы Al—Zn—Mg опасность представляет один из видов холодных трещин, так называемое задержанное разрушение, которое наблюдается в сварных соединениях после нескольких месяцев и даже лет эксплуатации. Предполагают, что оно происходит в результате структурных превращений, которые изменяют прочностные и пластические свойства на границах зерен, способствуют концентрации по ним рабочих и остаточных напряжений. Под их действием разрушается межзатомная связь между зернами α -твердого раствора и расположенными по границам зерен выделениями избыточных фаз. Хотя механизм задержанного разрушения в сварных соединениях окончательно не установлен, обнаруженные в процессе его изучения закономерности позволили создать сплав 1915 сварные соединения которого практически не склонны к задержанному разрушению. Это достигнуто за счет снижения максимального суммарного содержания цинка и магния до 5,7%. Дальнейшие изыскания эффективной стабилизации структурного состояния Al—Zn—Mg-сплавов позволят использовать в сварных конструкциях и другие более высоколегированные сплавы этой системы.

Пористость металла шва. Борьба с пористостью при сварке алюминия и его сплавов — сложная задача. Принято считать, что главной причиной пористости швов является водород. Основным источником водорода — влага, адсорбированная флюсами, покрытиями электродов поверхностью основного металла и проволоки, а также содержащаяся в гидратированной окисной пленке и в защитном газе и др. Наиболее опасные источники — недоброкачественный увлажненный защитный газ и гидратированная пленка на поверхности проволоки.

Избыток водорода в металле объясняется повышенной его растворимостью в жидком алюминии и резким уменьшением растворимости его в кристаллизующемся металле. Наивысшая растворимость водорода в алюминии имеет место при температуре $\sim 2000^\circ\text{C}$ и достигает 30 см^3 на 100 г металла. В твердом металле раствори-

мость водорода составляет $0,016\text{ см}^3$ на 100 г металла.

Образование пузырьков газа возможно в области температур от 2000°C до температуры кипения алюминия при нагреве и от 2000°C до температуры плавления в процессе охлаждения вплоть до момента затвердевания металла шва.

В первом случае парогазовые пузырьки могут появляться на тех или иных зародышах (неметаллических включениях) и в период перегрева жидкого металла вырасти до больших размеров еще до охлаждения. Иницировать пористость могут помимо растворенных газов также легко испаряющиеся примеси (цинк, магний). Во втором случае в период охлаждения и кристаллизации металла — образуется преимущественно рассеянная пористость вследствие скачкообразного изменения растворимости водорода при затвердевании металла.

При наличии сосредоточенной пористости по краям шва снижаются показатели угла изгиба сварного соединения.

Пористость (пустоты) металла шва объемом до 0,25% практически не влияет на статическую прочность. Уменьшение прочности наблюдается при объеме пустот свыше 0,5 об. %. Влияние пористости на механические свойства технического алюминия сказывается в меньшей степени, чем на свойства алюминиевых сплавов. С повышением прочности сплава отрицательное влияние пористости усиливается.

Поры при сварке алюминия имеют, как правило, шаровидную форму, и их влияние как концентраторов напряжений на прочность сварной конструкции меньше, чем влияние трещин. Повышенная пористость может снижать общую коррозионную стойкость соединений и благоприятствовать развитию язвенной коррозии. При сварке плавящимся электродом пористость швов выше, чем при сварке неплавящимся электродом.

Имеется ряд рекомендаций по уменьшению пористости сварных швов — технологического и металлургического характера.

Технологические мероприятия сводятся в основном к предупреждению попадания влаги в сварочную ванну. Требуется тщательное удаление гидратированной окисной пленки с поверхности проволоки и свариваемых кромок основного металла. В ряде случаев для обработки

проволоки после травления рекомендуется электрохимическое полирование, особенно для сплавов, содержащих магний. Состав электролита: 700 мл ортофосфорной кислоты H_3PO_4 , 300 мл серной кислоты H_2SO_4 , 42 г окиси хрома CrO_3 . Температура электролита 95—100 °С.

Необходимо соблюдать оптимальные условия газовой защиты шва при сварке. Следует стремиться к относительному уменьшению площади поверхности присадочной проволоки, т. е. применять присадочную проволоку возможно большего диаметра, а при использовании тонкой электродной проволоки применять импульсно-дуговую сварку. Желательно использовать коррозионно-стойкие трубки вместо резиновых для подачи газа от баллонов к горелке, так как при повышении температуры окружающей среды адсорбированная влага легче удаляется с внутренней поверхности резиновых трубок и попадает с аргоном в зону горения дуги. Рекомендуется периодически очищать сопло сварочной горелки от брызг и конденсата. Один из способов уменьшения пористости в металле шва — применение смеси защитных газов аргона с гелием (50—75% гелия по объему).

Металлургические мероприятия основаны на том, что уменьшение пористости возможно либо за счет ограничения протекания реакции взаимодействия жидкого металла с влагой путем увеличения скорости движения сварочной ванны, либо за счет создания условий для более полного протекания реакции удаления водорода путем увеличения продолжительности существования сварочной ванны. Детали малой толщины желательно сваривать на жестких режимах, т. е. по первому способу, а детали большой толщины — из термически неупрочняемых сплавов — по второму способу.

Иногда для уменьшения пористости перед сваркой применяют подогрев деталей, что увеличивает период времени пребывания металла сварочной ванны в жидком состоянии. Для уменьшения адсорбированной влаги на поверхности толстых листов (20 мм и более) необходим небольшой подогрев свариваемых кромок (до 40—60 °С) в месте начала сварки.

Повышенная пористость в металле шва чаще всего является следствием плохой предварительной подготовки поверхности кромок и сварочной проволоки или отклонений от заданных режимов сварки.

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА И ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ СВАРКЕ АЛЮМИНИЯ И ЕГО СПЛАВОВ

Контроль качества сварных соединений. Для сварных соединений алюминия и его сплавов применяют те же методы контроля, что и для других металлов. Выбор метода контроля определяется характером выпускаемой продукции, конкретными условиями производства и эксплуатации. В производственных условиях чаще всего применяют визуальный осмотр, испытание образцов-свидетелей и неразрушающие методы контроля качества узлов и сварных изделий в целом. Визуальному осмотру подвергают все швы при увеличении 2—8 крат. Размеры контрольных образцов-свидетелей выбирают такими, чтобы условия теплоотвода в районе сварного шва незначительно отличались от таковых в реальном изделии. Например, для однопроходной сварки алюминия толщиной 20 мм ширина пластин должна быть не менее 250 мм. Контрольные образцы сваривают на том же режиме, что и само изделие. Образцы-свидетели подвергают рентгеновскому просвечиванию, а затем разрезают на темплеты, предназначенные для металлографических исследований, физико-химического анализа металла шва и механических испытаний. В сварных швах не должно быть трещин, несплавлений и непроваров, а количество и размеры пор не должны выходить за пределы действующих технических условий.

Наличие дефектов внутри, а также непроваров в корне шва, по-разному сказывается на механических свойствах металла шва. Отношение временного сопротивления сварного соединения, содержащего дефекты, к временному сопротивлению основного металла, зависит от положения дефекта, марки сплава и метода испытания. При статическом растяжении сварных образцов технического алюминия и наличии пористости внутри шва показатели прочности почти не снижаются. Наличие непровара, глубина которого не превышает 20% высоты усиления шва, обеспечивает прочность соединения, близкую к прочности соединения с полным проваром. На низколегированных сплавах сварные швы с усилением и непроваром корня шва более склонны к снижению

прочности. Особенно чувствительны к непроварам односторонние швы высоколегированных алюминиевых сплавов, у которых статическая прочность сварных соединений снижается почти вдвое.

При переменных нагрузках отрицательное действие непроваров сказывается еще сильнее.

Эффективным средством строгого соблюдения технологии и обеспечения стабильного высокого качества выпускаемой продукции служат неразрушающие методы контроля. Из числа таких методов наибольшее распространение получили радиационные и акустические методы. При радиационно-дефектоскопическом контроле в качестве источников излучения применяют в основном рентгеновские аппараты. Гамма-дефектоскопы, а также другие возможные источники излучения, находят ограниченное применение. При радиационном (рентгеновском) просвечивании дефекты проецируются на рентгеновскую пленку. Поры и трещины на проявленной пленке выглядят более темными, а вольфрамовые включения более светлыми, чем остальной фон. Глубина их залегания определяется с помощью эталонных пластинок, располагаемых рядом с контролируемым швом.

Отечественная промышленность выпускает различные аппараты, которые позволяют просвечивать металл толщиной 3—100 мм и более. Для алюминия применяют аппараты напряжением до 160 кВ и 160—200 кВ. К первой группе относятся РУП-60-20-1; РУП-120-5-1; РУП-150-10-1; РУП-100-10 и РУП-160-6П. Ко второй — РУП-200-5-2; РУП-150/300-10 и др. В обозначениях отечественных аппаратов первая группа цифр означает максимальное напряжение в кВ, вторая — ток в мА, третья — модель (буква П в конце — панорамное излучение).

По своему действию к аппаратам, основанным на использовании рентгеновского излучения, при просвечивании алюминия приближаются гамма-дефектоскопы, оснащенные радиоактивным изотопом тулия. Радиоактивные изотопы иридия, цезия и в особенности кобальта из-за жесткости излучения для просвечивания алюминиевых сварных соединений практического применения не имеют.

Чем больше толщина металла, который необходимо просветить рентгеновским излучением, тем выше долж-

но быть напряжение на рентгеновской трубке. Чувствительность рентгенографического метода зависит также от типа рентгеновской пленки, толщины металла, эталонов сравнения. Обычно чувствительность данного метода контроля не превышает 10%. Это значит что, например, поры диаметром менее 10% толщины металла на рентгеновской пленке трудно различимы. Также неразличимы трещины и пленки, если направление рентгеновского излучения перпендикулярно к их поверхности.

При работе с рентгеновскими приборами требуется строго соблюдать правила техники безопасности, чтобы не пострадал не только оператор-рентгенолог, но и окружающий его персонал.

Для массовой продукции наряду с обычным рентгеновским просвечиванием применяют электронно-оптические преобразователи (РЭОП), и изображение рассматривают на флюороскопическом экране. Непосредственное наблюдение такого изображения затруднено из-за относительно малой яркости и необходимости вести его в темном изолированном помещении.

В настоящее время используют телевизионную технику, содержащую так называемые рентгеновидиконы, входной экран у которых чувствителен к рентгеновскому излучению. Улавливаемое видиконом изображение преобразуется и подается на телевизионный экран, который может находиться вдали от рентгеновского аппарата. Для контроля изделий ответственного назначения, например емкостной продукции, эксплуатация которой регламентируется Госгортехнадзором, для определения работоспособности изделий наряду с рентгеновским просвечиванием применяют акустические методы. Акустические методы охватывают частоты колебаний от звуковых (50—20 000 Гц) до ультразвуковых (свыше 20 кГц). Часто их объединяют одним термином — ультразвуковые. Ультразвуковые методы основаны на отражении звуковой волны от поверхности в месте перехода от газовой среды к твердому телу.

Основной метод ультразвуковой дефектоскопии сварных соединений — эхоимпульсный. Ультразвуковая волна вводится в изделие нормально или под небольшим углом к его поверхности, отражается от дефекта и принимается тем же искателем или искателем, расположенным рядом. Угол ввода луча выбирают таким образом,

чтобы свести к минимуму расстояние от искателя до сварного шва.

Для проведения ультразвукового контроля используют универсальные ультразвуковые дефектоскопы УДМ-1М, УДМ-3, ДУК-66 (диапазон частот 1—5 МГц) и др. Надежность ультразвукового контроля сварки определяется качеством акустического контакта между изделием и искателем, в связи с чем с контролируемой поверхности должны быть удалены выпуклости, брызги металла и т. п. Это затрудняет непрерывный контроль качества сварных соединений ультразвуковым способом на движущихся установках.

Наиболее ответственные изделия, в особенности емкости, работающие под давлением, контролируют на герметичность. В отличие от стальных алюминиевые сосуды теряют герметичность не только в связи с пористостью, а в основном вследствие окисных включений. На выбор метода и средств контроля течением влияет требуемая степень герметичности контролируемой емкости (по допустимой утечке рабочего продукта). Во многих случаях контрольное вещество значительно отличается от рабочего по массе и вязкости. Наиболее распространен способ контроля гидравлическим давлением. Для этого контролируемый объект заполняют рабочей жидкостью или водой, герметизируют, гидравлическим насосом создают в нем необходимое избыточное давление. После определенной выдержки давление снимают и объект контролируют осмотром и индикатором течи. Контролю герметичности подвергают изделие, в котором ранее дефекты не были выявлены неразрушающими методами контроля.

Техника безопасности. При сварке открытой дугой неизбежно ультрафиолетовое и инфракрасное излучение. Интенсивность излучения зависит от величины тока, характера горения дуги, рода защитного газа (аргон, гелий или их смеси), наличия флюсов. Наиболее интенсивное ультрафиолетовое излучение — при сварке неплавящимся электродом в гелии, аргоне и менее интенсивное — при сварке покрытыми электродами. Для защиты глаз, лица, шеи от излучения сварщик должен иметь маску или щиток с защитными стеклами — светофильтрами Э1, Э2, Э3, Э4 и Э5 различной прозрачности в соответствии с интенсивностью излучения для токов 100—500 А.

Для предохранения защитного стекла от сварочных брызг и пыли со стороны дуги перед ним вставляют сменное бесцветное стекло. Между темным и прозрачным стеклами необходим зазор 1 мм для защиты глаз от перегрева.

При дуговой сварке алюминия и его сплавов выделяется значительное количество аэрозолей, состоящих из пыли алюминия, окиси алюминия и его сплавов и других примесей. Предельно допустимая концентрация твердых примесей 2 мг/м³, окислов азота 5 мг/м³, озона 0,1 мг/м³.

Для удаления пыли и газов от места их образования используют местную вентиляцию. Кроме того, в закрытом помещении (цехе) необходима общеобменная вентиляция с вытяжкой из верхней зоны помещения и притоком воздуха комнатной температуры в зону пребывания обслуживающего персонала. Сварка внутри сосудов и малогабаритных помещений без приточно-вытяжной вентиляции не допускается. Все остальные требования техники безопасности те же, что и при сварке других металлов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Акулов А. И., Сокол И. А. Сварка трубопроводов из цветных металлов. М.: Госстройиздат, 1962. 120 с. с ил.
2. Газоэлектрическая сварка алюминиевых сплавов / С. Н. Киселев, В. А. Хаванов, В. В. Рощин, В. И. Тарсен. М.: Машиностроение, 1972. 176 с. с ил.
3. Неразрушающие методы контроля сварных соединений / С. В. Румянцев, В. А. Добромислов, О. И. Борисов, Н. Т. Азаров. М.: Машиностроение, 1976. 336 с. с ил.
4. Справочник по алюминиевым сплавам / Под ред. В. И. Елагина. М.: ВИЛС, 1978. 132 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Алюминиевые сплавы для сварных конструкций	3
Технологические и конструктивные особенности сварки алюминия	10
Материалы для сварки алюминия и его сплавов	25
Дуговая сварка алюминия и его сплавов	35
Выбор способа сварки и свойства сварных соединений	67
Трещины и поры в сварных соединениях, основные методы их предотвращения	76
Контроль качества и техника безопасности при сварке алюминия и его сплавов	89
Список литературы	94

УДБ № 3876

**Даниил Маркович Рабкин,
Владимир Георгиевич Игнатьев,
Игорь Владимирович Довбищенко**

**ДУГОВАЯ СВАРКА АЛЮМИНИЯ
И ЕГО СПЛАВОВ**

Редактор **Т. Е. Черешнева**
Художественный редактор **Ю. Г. Ворончихин**
Технический редактор **Н. М. Михайлова**
Корректоры **И. М. Борейша** и **В. Е. Блохина**

Сдано в набор 03.09.82. Подписано к печати 04.11.82. Т-16388. Формат 84×108^{1/32}. Бумага книжно-журнальная. Гарнитура литературная. Печать высокая. Усл.-печ. л. 5,04. Уч.-изд. л. 5,49. Тираж 20 000 экз. Заказ 1108. Цена 25 к.

Ордена Трудового Красного Знамени
издательство «Машиностроение», 107076,
Москва, Б-76, Стромьинский пер., 4.

Типография № 32. Москва, Цветной бульвар, д. 26.