

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО
СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР

КУЙБЫШЕВСКИЙ ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ
АВИАЦИОННЫЙ ИНСТИТУТ имени академика С. П. КОРОЛЕВА

Л. А. ДУДАРЬ

**ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ
АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ,
ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ПРОИЗВОДСТВЕ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

*Утверждено редакционным
советом института
в качестве конспекта лекций*

Дударь Л. А. Особенности сварки плавлением алюминиевых сплавов, используемых в производстве летательных аппаратов. Конспект лекций. — Куйбышев: КуАИ, 1985, 54 с.

Излагаются наиболее прогрессивные технологические процессы получения сварных соединений из алюминиевых сплавов, направленные на повышение механических свойств и герметичности.

Дан научный анализ возможности получения качественных соединений такими процессами сварки, как аргонодуговая неплавящимся электродом с применением дискретной подачи присадочного материала. Рассматривается применение гелиево-дуговой сварки прямой полярности и импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом, сварки трехфазной дугой, а также вопросы механизации удаления окисной пленки как с поверхности основного металла, так и с проволоки, являющейся основной причиной нарушения герметичности сварных соединений.

Пособие предназначено студентам старших курсов дневной и вечерней формы обучения специальностей 0535, 0539 и 0543.

Ил. 16, табл. 17, библиогр. — 36.

Рецензенты: Н. Б. Фейгейсон, В. П. Еремин

ПРЕДИСЛОВИЕ

Повышение качества продукции и снижение материальных и трудовых затрат на ее изготовление является постоянно действующим фактором любого производства. Работоспособность, надежность и долговечность сварных конструкций, их технологичность при изготовлении и монтаже определяются, в основном, конструктивными и технологическими решениями.

Правильный выбор комплекса таких решений может быть выполнен проектировщиками лишь при всестороннем учете всех специфических особенностей, вносимых в работу конструкции сваркой.

Одним из направлений успешного решения этой задачи в области сварочного производства является совершенствование технологических процессов сварки с целью предупреждения образования характерных дефектов швов, снижающих эксплуатационные характеристики сварных соединений.

В большинстве конструкций летательных аппаратов независимо от их принадлежности к тому или иному классу имеются ответственные узлы, изготавливаемые из алюминиевых сплавов сваркой плавлением. Поэтому на первом плане стоит проблема получения сварных соединений из алюминиевых сплавов, отличающихся герметичностью в глубоком вакууме, высокой прочностью в сложных условиях нагружения, стойкостью против коррозии.

По сварке алюминиевых сплавов плавлением к настоящему времени имеются монографии и много журнальных публикаций, освещающих отдельные вопросы особенностей этой сварки.

Цель настоящей работы — дать краткое систематизированное изложение комплекса вопросов, с кото-

рыми встречаются студенты и инженеры-механики при проектировании и производстве летательных аппаратов.

В связи с этим в предлагаемом пособии основное внимание уделяется особенностям сварки плавлением алюминиевых сплавов, анализу причин возникновения дефектов сварных соединений и обоснованию технологических мероприятий, направленных на их предупреждение.

Особое внимание уделено природе и механизму возникновения дефектов в металле шва, вызванных присутствием окисных включений и водорода. Известно, что большинство дефектов литой структуры сварных швов возникает на этапе кристаллизации, поэтому управление качеством сварных швов должно осуществляться прежде всего на этой стадии образования сварного соединения.

В предлагаемом пособии рассматриваются способы управления формированием первичной структуры литого металла. Освещаются также вопросы подготовки поверхности основного металла и присадочной проволоки перед сваркой, условий сварки на образование и разрушение окисной пленки, механизм ее разрушения в процессе дуговой сварки в среде различных газов. Этот механизм рассматривается применительно к аргонодуговому и гелиево-дуговому процессам сварки неплавящимся и плавящимся электродами, особенностям сварки переменным однофазным и трехфазным током, переменным асимметричным током, постоянным током на прямой и обратной полярностях, плазменной сварке. Особое внимание уделено рассмотрению сварки неплавящимся электродом в защитных газах с прерывистой подачей электродной проволоки.

1. ЛЕТАТЕЛЬНЫЙ АППАРАТ КАК ОБЪЕКТ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА

1.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Летательный аппарат любого типа создается для выполнения определенных задач. В зависимости от назначения летательного аппарата те или иные его свойства являются наиболее существенными для решения поставленной задачи. От сочетания этих свойств зависит эффективность летательного аппарата, которую можно определить как степень его соответствия решаемым задачам.

В настоящее время практически невозможно создать аппарат, который в одинаковой мере успешно мог бы выполнять различные функции. Этим и объясняется большое многообразие летательных аппаратов.

Летательные аппараты можно классифицировать по принципу полета, по назначению и конструктивным признакам (по типу, числу и расположению двигателей, по общим схемам летательных аппаратов, по типу стартовых и посадочных устройств и т. д.). По первым двум признакам /1/ летательные аппараты делятся на: аппараты, совершающие аэродинамический полет и аппараты, совершающие баллистический полет.

Летательные аппараты первого класса расходуют энергию запасенного топлива для создания подъемной и управляющих сил с помощью воздушной среды. К ним относятся самолеты, крылатые ракеты* и вертолеты. Аппараты второго класса не требуют внешней среды для создания подъемных и управляющих сил. Ко второму классу относятся баллистические ракеты.

Отличие крылатых ракет от баллистических состоит в принципе полета. У крылатой ракеты необходимая для полета подъемная сила создается так же, как и у обычных самолетов, крылом. Ввиду этого ее полет должен совершаться в нижних слоях земной атмосферы при работающих двигателях.

Для полета баллистических ракет не требуется создания подъемной силы с помощью крыла. На основной (пассивной)

* Иногда их именуют самолетами-снарядами.

части траектории они описывают некоторую баллистическую кривую (выражаемую обычно уравнением эллипса) за счет начального импульса, сообщенного им двигателями на активном участке траектории. Полет дальних баллистических ракет происходит в основном на больших высотах, где вследствие большого разрежения атмосферы явления аэродинамического нагрева практически отсутствуют.

Двигатели баллистических ракет должны сообщать им в короткий промежуток времени большой запас энергии для дальнейшего движения. Такими свойствами в настоящее время обладают только ракетные двигатели на жидком или твердом топливе.

Между указанными выше двумя классами летательных аппаратов нет четкой границы. Существует промежуточный тип аппаратов, сочетающих баллистический полет с планированием в воздушной среде. К нему относятся планирующие баллистические аппараты (ракетопланы). В некоторых случаях и самолеты, совершая аэродинамический полет, могут использовать накопленную при этом энергию для баллистического полета. Таким образом они могут подняться на высоту, значительно превышающую их практический потолок.* Кроме того, на баллистических ракетах могут устанавливаться воздушные рули для создания управляющих сил.

Принцип полета включает и способ управления. С этой точки зрения летательные аппараты разделяются на пилотируемые и беспилотные. Естественно, что все пилотируемые аппараты служат для многократного применения. Большинство беспилотных аппаратов предназначено для однократного применения.

Баллистические ракеты в настоящее время широко применяются для исследовательских целей (как метеорологические ракеты, а также для запуска спутников и космических кораблей).

Следует иметь в виду, что установившейся классификации летательных аппаратов не существует. Она меняется с развитием науки и техники.

1.2. ВНЕШНИЕ НАГРУЗКИ, ДЕЙСТВУЮЩИЕ НА ЛЕТАТЕЛЬНЫЙ АППАРАТ

Создание конструкции летательного аппарата, обладающей при минимальной массе достаточной прочностью и жесткостью, существенно зависит от правильности учета действующих на нее внешних нагрузок.

* Эту высоту обычно называют энергетическим или динамическим потолком.

Все внешние нагрузки можно разделить на две категории: а) нагрузки, действующие на летательный аппарат и его отдельные части в полете (аэродинамические силы, силы тяги, массы, а также силы инерции); б) нагрузки, действующие на летательный аппарат и его отдельные части при транспортировке, взлете и посадке.

Коэффициент безопасности. Критерием прочности авиационных конструкций являются результаты их статических испытаний до разрушения /2/. Поэтому в качестве расчетной нагрузки принимается разрушающая, которая должна быть всегда больше эксплуатационной нагрузки.

Эксплуатационная и разрушающая нагрузки связаны между собой коэффициентом безопасности, величина которого нормируется для каждого случая нагружения. Коэффициент безопасности есть число, показывающее во сколько раз разрушающая нагрузка* (перегрузка n_p) больше нормированной эксплуатационной нагрузки (перегрузки n_s), т. е.

$$f = \frac{P_{\text{разр}}}{P_s} = \frac{n_p}{n_s}. \quad (1.1)$$

Коэффициент безопасности выбирается с учетом характера нагрузок, их повторяемости, требуемой степени надежности рассчитываемого агрегата и усилий эксплуатации аппарата. Значительное повышение разрушающей нагрузки по отношению к эксплуатационной (нормированной) приводит к перетяжелению конструкции, а следовательно, к ухудшению летно-технических данных аппарата.

До появления сверхзвуковых аппаратов минимальное значение коэффициента безопасности определялось, в основном, условием отсутствия остаточных деформаций в конструкции от действия эксплуатационных нагрузок. Для летательных аппаратов больших скоростей этот критерий теряет смысл, так как остаточные деформации возникают практически при любых значениях нагрузок за счет ползучести материала при работе конструкции в условиях повышения температур. Поэтому целесообразно в ряде случаев вообще отказаться от понятия коэффициента безопасности, ведя расчет по эксплуатационным нагрузкам, нормируя лишь предельно допустимые деформации.

Численное значение коэффициента безопасности (применительно к различным случаям нагружения основных частей летательного аппарата) задается в пределах $f = 1,2..2,0$.

В тех случаях, когда нагрузки повторяются в эксплуатации часто, для коэффициента безопасности берется верхний предел

*В нормах прочности принято разрушающую перегрузку обозначать без индекса.

из-за возможности усталостного разрушения конструкции. В случае нагрузок, повторяющихся в эксплуатации редко, коэффициент безопасности $f = 1,5$.

Для беспилотных аппаратов одноразового действия опасность усталостного разрушения меньше, кроме того, для них допустимы определенные остаточные деформации. Эти обстоятельства позволяют назначать для аппаратов одноразового действия более низкие значения коэффициента безопасности по сравнению с другими типами летательных аппаратов, например, в пределах $f = 1,2 \dots 1,3$.

1.3. КОНСТРУКТИВНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СВАРНЫХ УЗЛОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Работоспособность, надежность и долговечность сварных конструкций, их технологичность при изготовлении и монтаже, а также другие технические качества определяются, в основном, конструктивными и технологическими решениями, которые принимаются при проектировании конструкции и технологии ее изготовления.

Выбор оптимального комплекса конструктивных и технологических решений представляет сложную задачу. Из многих возможных вариантов необходимо выбрать один, обеспечивающий получение от конструкции требуемых качеств при минимальных затратах труда, материалов и других средств производства. Правильный выбор комплекса решений может быть выполнен проектировщиками лишь при всестороннем учете всех специфических особенностей, вносимых в работу конструкции сваркой.

Важнейшими особенностями сварных конструкций, которые совместно с общими принципами должны учитываться при проектировании, являются следующие.

1. Монолитность сварных соединений, наступающая при их выполнении и вызывающая совместное деформирование соединяемых элементов и всей конструкции в целом при сварке и последующем остывании.

2. Изменение размеров и формы соединяемых элементов, а также всей конструкции в целом в результате накопления в областях значительного разогрева при сварке местных пластических деформаций и местных и общих упругих деформаций всей конструкции.

3. Накопление в отдельных областях, элементах, узлах и во всей конструкции остаточных сварочных напряжений, пиковые значения которых достигают величины предела текучести металла конструкции.

4. Изменение напряженного и деформированного состояния элементов, узлов и всей конструкции вследствие выполнения после сварки технологических процессов, связанных с термическим или механическим воздействием на конструкцию, а также в результате воздействия на конструкцию в эксплуатации силовых и термических нагрузок.

5. Снижение пластичности в отдельных зонах металла конструкции, особенно в районах расположения концентраторов, претерпевающих большие пластические деформации в процессе сварки.

Учет перечисленных особенностей сварных конструкций при проектировании их требует определения напряженного состояния и ожидаемых сварочных деформаций, соответствующих рассматриваемому варианту конструктивных и технологических решений. Определение сварочных деформаций и напряжений необходимо также для анализа их влияния на процесс изготовления конструкций и их поведения в эксплуатации.

1.4. КЛАССИФИКАЦИЯ СВАРНЫХ ШВОВ

В большинстве конструкций летательных аппаратов (независимо от их принадлежности к тому или иному классу) имеются ответственные узлы, изготовленные из алюминиевых сплавов сваркой плавлением.

Конструкцию сварных узлов летательных аппаратов, как правило, оценивают с точки зрения расположения, конфигурации, числа сварных швов, конструктивного оформления свариваемых элементов. Конструкция должна содержать минимальное количество сварных швов, протяженность их должна быть минимально возможной, пересечения сварных швов должны отсутствовать или их число должно быть незначительным. Увеличение количества сварных швов и их протяженности, наличие пересечения швов может приводить к значительным концентрациям напряжений, снижению прочности, деформациям узла.

Наиболее технологичными по конфигурации являются прямолинейные и кольцевые (меридианальные) швы, расположенные на плоских поверхностях и телах вращения — цилиндрах, конусах, сферах. Классификация таких швов приведена в табл. 1.1 /3/.

Наличие таких швов позволяет применять стандартное, серийно выпускаемое сварочное оборудование — сварочные автоматы, манипуляторы, стенды, более простую унифицированную сварочную оснастку, позволяет механизировать и автоматизировать процесс сварки узлов в условиях даже мелкосерийного производства. Наличие швов сложной конфигурации, располо-

женных на плоских поверхностях или телах вращения, на поверхностях сложной кривизны (табл. 1.1, швы третьего класса), требуют в ряде случаев применения специальной сварочной оснастки. Механизация и автоматизация процесса сварки таких швов представляет определенные трудности, и в условиях мелкосерийного производства сварка швов сложной конфигурации чаще всего ведется вручную. Вместе с тем высокие требования к качеству сварных узлов летательных аппаратов обязывают изыскивать пути механизации процессов сварки криволинейных швов. В некоторых случаях эта задача может быть решена за счет разработки приспособлений, в которых используются копиры и программные устройства.

Расположение сварных швов должно быть таким, чтобы обеспечивался свободный доступ к ним сварочных головок, электродов и инструмента, свободный доступ для сборки и монтажа съемной сварочной оснастки, осмотра и контроля, устранения дефектов, механической обработки, если она необходима.

Нетехнологичным является расположение шва, близкое к выступающим частям детали (например, буртам), так как это затрудняет процесс сварки и увеличивает концентрацию напряжений. Напряжение шва против бурта существенно ухудшает условия проведения рентгеновского контроля. Малое расстояние между соседними швами приводит также к ухудшению структуры металла и увеличению концентрации напряжений.

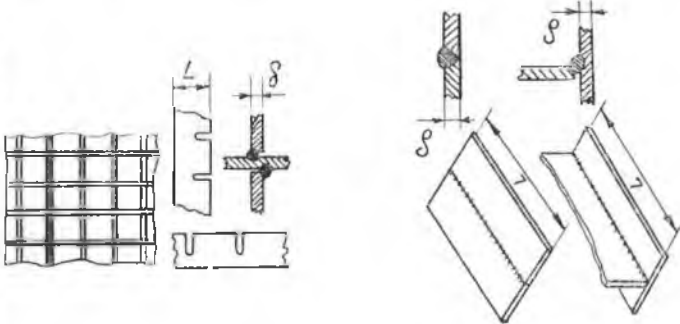
Большое влияние на качество сварки оказывает соотношение толщин соединяемых элементов деталей и количество свариваемых одновременно деталей.

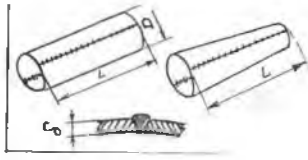
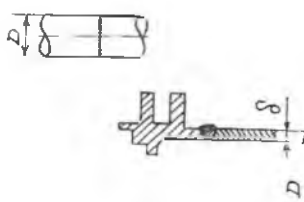
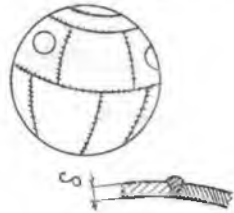
При сварке плавлением не рекомендуется соединения трех и более деталей одним швом. Желательно, чтобы толщина соединяемых элементов была одинаковой или отличалась незначительно. Толщина свариваемых деталей влияет на выбор вида сварки.

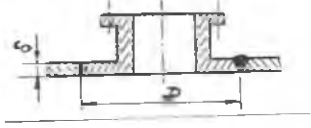
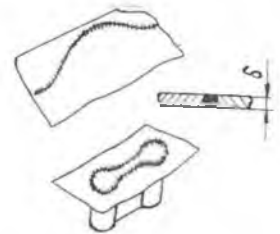
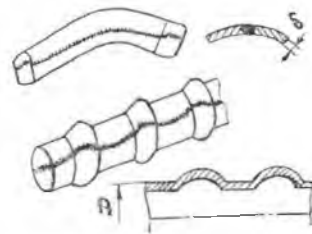
Конструктивное оформление сварных швов должно соответствовать нормам и стандартам.

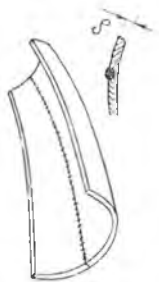
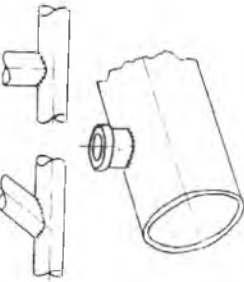
При сварке плавлением наиболее технологичны стыковые соединения: они имеют высокую прочность как при статических, так и при знакопеременных нагрузках, чем и объясняется широкое применение их в конструкциях. Соединение в тавр обладает значительно меньшей прочностью, особенно при знакопеременных нагрузках. Соединения в нахлестку просты в изготовлении и достаточно технологичны. Однако прочность этих соединений, особенно усталостная, невелика. Эти соединения применяются редко, только тогда, когда невозможно другое конструктивное решение.

Таблица 1.1.

Класс	Группа	Эскиз	Соединение элементов	Типовые конструкции
1	2	3	4	5
1. Прямолнейные швы	1. На плоских поверхностях	<p data-bbox="228 624 253 934">Сварка плавлением</p> 	Лист с листом, лист с профилем	Заготовки из нескольких листов для последующей штамповки, крошечные, балочки, каркасы агрегатов

1	2	3	4	5
I. Прямолинейные швы	2. На цилиндрических и конических поверхностях		Лист с листом	Обечайки
II. Кольцевые швы	1. На поверхностях тел вращения (сферических, цилиндрических, конических) замкнутые и незамкнутые		Труба с трубой	Трубопроводы, цилиндры
			Лист с листом, лист с профилем	Обечайки, днища, шарбаллоны, сферы

1	2	3	4	5
III. Криволинейные швы	2. На плоских поверхностях		Лист с фланцем (штуцером)	Фланцы, штуцеры на емкостях
	1. На плоских поверхностях замкнутые и незамкнутые		Лист с листом, лист с трубой	
	2. На криволинейных поверхностях в одной плоскости незамкнутые и замкнутые		Лист с листом	Патрубки, трубы, панели

1	2	3	4	5
III. Криволинейные швы	2. На криволинейных поверхностях в одной плоскости, незамкнутые и замкнутые		Лист с листом	Бак
	3. На криволинейных поверхностях в нескольких плоскостях, замкнутые		Труба с трубой Лист с фланцем на обечайках	Фермы, фланцы Формы, фланцы на обечайках

Кроме указанных выше показателей, технологичность сварных узлов может оцениваться и по общим критериям, используемым для оценки технологичности клепаных конструкций, таким, как членение узла (агрегата) на отдельные под сборки, коэффициент использования нормализованных и стандартизованных заготовок (листов, профилей, труб) для изготовления деталей и др. Окончательной оценкой эффективности предлагаемого конструктивного оформления сварного узла является его наименьшая технологическая себестоимость.

2. ОСОБЕННОСТИ ПОДГОТОВКИ АЛЮМИНИЯ И ЕГО СПЛАВОВ К СВАРКЕ

2.1. ХИМСОСТАВ И ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА СВАРИВАЕМЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

Алюминиевые сплавы по своим физико-механическим свойствам являются наиболее важным конструкционным материалом в производстве летательных аппаратов. В самолетостроении алюминиевые сплавы составляют около 3/4 доли всех материалов.

Как известно, алюминиевые сплавы разделяются на две основные группы: деформируемые и литейные. Теоретической границей, разделяющей эти сплавы, служит предел растворимости элементов в твердом растворе (рис. 2.1). Содержание легирующих элементов в деформируемых сплавах обычно не превышает 8...9%, т. е. меньше предела растворимости, и при нагреве могут быть переведены в однофазное состояние, при котором обеспечивается их высокая деформационная способность. Концентрация легирующих элементов в литейных сплавах превышает их предельную растворимость в алюминии и имеет в структуре эвтектику.

Деформируемые алюминиевые сплавы в свою очередь разделяются на неупрочняемые термообработкой и термоупрочняемые. К термоупрочняемым относятся сплавы, имеющие концентрацию леги-

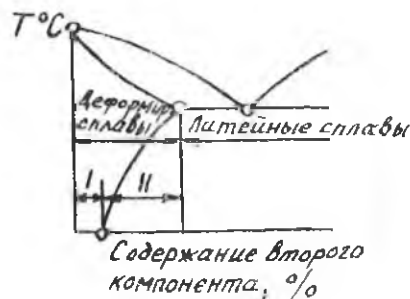


Рис. 2.1. Классификация алюминиевых сплавов по бипарной диаграмме состояния: I — сплавы, не упрочняемые термообработкой; II — сплавы, упрочняемые термообработкой

Функциональное обозначение	Цифровая маркировка	Состав, %									
		Ca	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Zr	Cr	Be
Система Al											
АД0	1011	<0,02	<0,05	<0,025	<0,30	<0,30	<0,1	<0,1	—	—	—
АД1	1013	<0,05	<0,05	<0,025	<0,30	<0,30	<0,10	<0,15	—	—	—
Система Al—Mn											
АМ2	1400	<0,15	<0,2	1,0—1,6	0,7	<0,6	<0,1	<0,2	—	—	—
Система Al—Mg—Mn											
АМГ1	1510	<0,1	0,4—1,7	<0,2	<0,10	<0,10	—	—	—	—	—
АМГ3	1530	<0,1	3,2—3,8	0,3—0,6	<0,5	0,5—0,8	<0,2	<0,1	—	<0,05	—
АМГ5	1550	<0,1	4,8—5,8	0,3—0,8	<0,5	<0,5	<0,2	0,02—0,10	—	—	0,0002—0,005
АМГ6	1560	0,1	5,8—6,8	0,5—0,8	0,4	0,4	0,2	0,02—0,10	—	—	0,0002—0,005
Система Al—Mg—Si											
АВ	1340	0,1—0,5	0,45—0,9	0,15—0,35	0,5	0,5—1,2	0,2	0,15	—	—	—
Система Al—Zn—Mg											
—	1915	<0,1	1,3—1,8	0,2—0,6	0,4	0,3	3,4—4,0	0,1	0,15—0,22	0,08—0,20	—
Система Al—Cu—Mn											
АД20	1201	5,8—6,8	<0,02	0,2—0,4	<0,3	<0,2	<0,1	0,02—0,1	0,1—0,25	0,05—0,15	—

рующих элементов больше предела растворимости при комнатной температуре (см. рис. 2.1).

В сварных конструкциях летательных аппаратов получили наибольшее распространение деформируемые алюминиевые сплавы, не упрочняемые термообработкой (АМц, АМг, АМг3, АМг5В, АМг6 и др.) и термоупрочняемые (Д19, М40, Д20, ВД23, В92А, АЦМ и др.), а также алюминий АД, АД1 и др.). Химический состав и механические свойства некоторых сплавов приведены в табл. 2.1 и 2.2.

Литейные сплавы в сварных конструкциях летательных аппаратов применяются реже.

Таблица 2.2

Марка	Вид термообработки	Временное сопротивление, мПа	Условный предел текучести, мПа	Относительное удлинение, %	Твердость по Бринеллю, НВ
АД1	М	80	30	35	25
	П	120	80	15	30
АМц	М	120	50	23	30
	П	180	130	10	40
АМг2	М	190	90	23	45
	П	250	210	8	68
АМг3	М	225	120	22	58
АМг5	М	300	160	20	65
АМг6	М	340	170	20	—
	П	360	—	12	—
	Н	380	280	6	—
АВ	Т1	350	290	12	95
Д201	Т1	420	300	12	—
Д1915	Т1	380	250	8	—

Примечание. Т1 — закаленный и искусственно состаренный, М — отожженный, П — полунагартованный, Н — нагартованный.

К особенностям сварки алюминия и его сплавов следует отнести следующие:

1. Наличие и возможность образования тугоплавкого оксида ($T_{пл.} = 2050^{\circ}\text{C}$);
2. Резкое падение прочности при высоких температурах;
3. Большая величина коэффициента линейного расширения;
4. Высокая теплопроводность;
5. Склонность к возникновению трещин.

В производстве летательных аппаратов сварку алюминиевых сплавов плавлением осуществляют в основном электродуговыми

способами неплавящимися и плавящимися электродами в защитной среде нейтральных газов аргона и гелия. В последнее время все большее применение находит сварка электронным лучом в вакууме.

2.2. ОКИСНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ ПРИ СВАРКЕ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

При сварке алюминиевых сплавов неплавящимся электродом одним из наиболее часто встречающихся дефектов шва являются окисные включения, причем с увеличением толщины листов этот дефект становится преобладающим.

Алюминий обладает способностью активно взаимодействовать с кислородом. Окисление алюминия протекает при нормальной и повышенных температурах при ничтожно малом парциальном давлении кислорода или сложных газов, содержащих кислород. Так, например, при температуре 1000°C реакция окисления алюминия может протекать уже при $P_{\text{O}_2} = 4,406 \cdot 10^{-46}$ ат. /4/. Образующаяся в результате этого взаимодействия окись алюминия Al_2O_3 покрывает поверхность изделий прочной (2 кгс/мм² при толщине 10^{-5} см) и плотной (отношение объема окисла к объему окислившегося металла 1,24) окисной пленкой. Предельная толщина пленки при выдержке алюминия в атмосфере воздуха при температуре 20°C устанавливается через 7—14 дней и достигает 50...100 Å.

Дальнейшее окисление металла и наращивание окисной пленки по толщине возможно лишь при повышенных температурах за счет диффузии катионов металла через пленку к поверхности газ—окисел.

Поскольку радиус катиона (Al^{3+} 0,50 Å) значительно меньше аниона кислорода (O^{2-} 1,40 Å), диффузией анионов кислорода можно пренебречь и считать, что скорость окисления и наращивания окисной пленки по толщине определяется в основном диффузией катионов металла через решетку окисла /5/. Зависимость константы скорости окисления от температуры должна подчиняться зависимости

$$K = A \left(\exp - \frac{Q}{RT} \right),$$

где Q — энергия активации, кал.; A — постоянная, имеющая ту же размерность, что и K .

Энергия активации процесса окисления жидкого алюминия равна 61500 кал/моль, а коэффициент $A = 2,51 \text{ г}^2 \cdot \text{сек}^{-1}$ /6/.

Окисел Al_2O_3 отличается большой химической прочностью, устойчив против диссоциации и реакции с другими металлами

в твердом состоянии, не растворяется ни в твердом, ни в жидком металле. Восстановление алюминия из окисла в условиях металлургических процессов, в том числе и сварки, практически исключено. Коэффициент теплового расширения окисной пленки почти в три раза меньше коэффициента расширения алюминия, поэтому при нагреве металла в окисной пленке образуются трещины.

Важнейшей характеристикой окисной пленки алюминия является ее высокая адсорбционная способность к парам воды. Пар удерживается окисной пленкой вплоть до температуры плавления металла.

Частицы окисной пленки, замешанные в ванну, а также часть пленок с поверхности основного металла, не разрушенные в процессе сварки, могут образовывать окисные включения в швах, снижать свойства соединений и их работоспособность.

Для осуществления сварки должны быть приняты меры по разрушению и удалению пленки и защите металла от повторного окисления.

2.3. ВЛИЯНИЕ ПОДГОТОВКИ ПОВЕРХНОСТИ И УСЛОВИЙ АРГОДУГОВОЙ СВАРКИ НА ОБРАЗОВАНИЕ И РАЗРУШЕНИЕ ОКИСНОЙ ПЛЕНКИ

Окисные включения в шве появляются в результате наличия плен, имеющихся на поверхности стыкуемых элементов и присадочной проволоки. Наличие загрязнений на этих поверхностях увеличивает количество окисных включений в швах.

Наличие поверхностных загрязнений приводит к изменению свойств образовавшихся окисных пленок. Изучение изломов сварных швов позволило установить, что при отсутствии загрязнений на кромках до сварки окисные включения блестящие, при наличии пылевых частиц — от светло-серого до темно-серого цвета, а жировых загрязнений — от светло-коричневого до черного цвета /7/.

Основными источниками поверхностных загрязнений являются: адсорбированная влага, пыль, оседающая на свариваемые кромки из воздуха производственных помещений, и жировые загрязнения от касания кромок руками. Относительная влажность производственного помещения не должна превышать 70%. Запыленность воздуха не должна превышать 2 м/м^3 /8/. Исследователи В. И. Оботуров и Ю. И. Толкачев /7/ разрушения окисных пленок изучали на образцах, свариваемые кромки которых были покрыты искусственной пленкой толщиной 3..5 мкм, полученной путем анодного окислирования. Кромки перед свар-

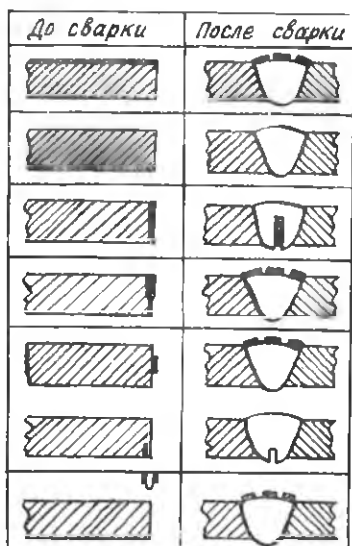


Рис. 2.2. Поведение искусственной окисной (анодной) пленки при аргодуговой сварке вольфрамовым электродом в зависимости от ее месторасположения

переходит на более мелкие частицы. Импульсный режим сварки способствует разрушению окисных пленок в ванне вследствие большей глубины проплавления и интенсивности конвективных потоков.

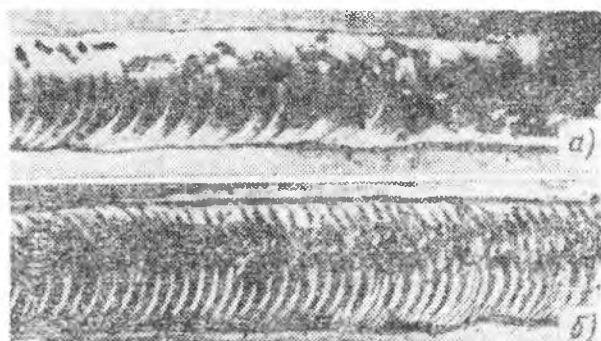


Рис. 2.3. Внешний вид швов, выполненных непрерывной (а) и импульсной (б) сваркой, при расположении анодной пленки до сварки в центральной части торца

кой зачищали так, чтобы анодная пленка оставалась в разных местах (рис. 2.2).

Если окисная пленка расположена в верхней и центральной части торца, на верхней поверхности кромок или на поверхности присадочной проволоки, то она при сварке разрушается и выносится потоком расплавленного металла на поверхность ванны, а если на нижней поверхности кромок — остается на поверхности проплава. В то же время окисные пленки, расположенные в нижней части торца и имеющие намного меньшую поверхность, остаются на месте и препятствуют сплавлению свариваемых кромок (см. рис. 2.2). На рис. 2.3 показаны швы, выполненные непрерывной и импульсной сваркой при расположении анодной пленки до сварки в центральной части торца. При сварке импульсной дугой разрушение искусственной пленки про-

При сварке в оптимальном диапазоне импульсного режима количество окисных включений в швах значительно меньше, чем при непрерывной сварке при прочих равных условиях /9, 10/.

С целью более эффективного удаления окисных плен необходимо производить тщательную подготовку торца перед сваркой, особенно нижней его части. Однако крайне важно, чтобы окисные пленки разрушались в сварочной ванне и конвективными потоками выносились на поверхность.

2.4. ПОДГОТОВКА ПОВЕРХНОСТИ ОСНОВНОГО МЕТАЛЛА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ ПЕРЕД СВАРКОЙ

Существует несколько способов очистки поверхности алюминиевых сплавов перед сваркой: химическое травление в растворе щелочи с последующим осветлением в азотной кислоте, электрополирование, механическая зачистка, включая шабрение, катодное распыление и пр.

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 (Na_2SiO_3). Продолжительность процесса обезжиривания зависит от степени загрязнения металла и температуры. При температуре раствора 60...70°C время обезжиривания обычно не превышает 3...5 мин. После обезжиривания детали или проволоку опускают в 5% 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 детали сначала горячей, а затем холодной водой, одновременно протирая их волосяными щетками. Сразу же после промывки детали пассивируют в 20% азотной кислоте (HNO_3), нагретой до температуры 60...70°C. За 5...7 мин. пребывания в растворе поверхность детали покрывается новым, более плотным слоем оксид алюминия. Извлеченные из азотной кислоты детали промывают в холодной, а затем в горячей воде и сушат подогретым воздухом.

Первый способ достаточно производительный и обязательный для всех свариваемых деталей, но не всегда обеспечивает необходимое качество сварных соединений, особенно в тех случаях, когда выдержка металла (от момента обработки до сварки) превышает несколько суток. В атмосферных условиях толщина образованной пленки увеличивается, хотя и более медленно, поэтому подготовленные к сварке детали необходимо сварить в течение 24 час., а сварочную проволоку использовать

в течение 8 час. 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 — шабрением. Образовавшаяся после шабрения тончайшая пленка окиси легко удаляется сварочной дугой, горящей в среде инертных газов, что обеспечивает более стабильные свойства соединений. Более стабильные свойства соединений дает электрополирование или механическая зачистка поверхности шабрением. Однако производительность процесса недостаточна. Возможна очистка катодным распылением.

Катодное распыление — это способность газового разряда и, в частности, сварочной дуги распылять материал катода /11, 12/. Данный эффект используется для разрушения окисной пленки при аргодуговой сварке алюминия /11/ и для очистки поверхности изделия перед наплавкой /13/. В противоположность другим методам очистки катодная очистка поверхности отличается универсальностью и высокой производительностью.

Катодное распыление обеспечивает снятие с поверхности металла слоя любой толщины, содержащего следы проникновения нежелательных элементов или загрязнений. Сущность катодного распыления заключается в том, что при бомбардировке тяжелыми заряженными частицами — ионами — с поверхности катода выбиваются атомы бомбардируемого вещества.

Активация поверхностей предполагает полное удаление окисных пленок со всей зоны действия катодного пятна и исключает сорбцию газа на очищенную поверхность. Это возможно согласно критерию Джонса-Гаррисона при превалировании распыления над сорбцией газов /11/

$$n S > n_i f_s.$$

где $n_s = 3,5 \cdot 10^{22} \frac{P}{V \Delta T_K}$ — количество сорбированных частиц;

V — молекулярный (атомный) вес вещества; T — температура, К; P — давление дуги, равное атмосферному; S — коэффициент катодного распыления; f_s — коэффициент сорбции.

Коэффициент катодного распыления S является основным параметром процесса и характеризуется количеством атомов вещества, выбитых одним ионом. Применительно к сварочной дуге коэффициент катодного распыления можно представить следующим выражением

$$S = \frac{n_a}{n_i} = 9,65 \cdot 10^4 \frac{q}{f I_{св} A}.$$

где n_a и n_i — число атомов и ионов соответственно; $q = \frac{\Delta m}{t}$ — количество вещества, распыленного в 1 с., г/с; f — ионная

составляющая сварочного тока; $I_{\text{св}}$ — сварочный ток, А; A — атомный вес вещества, г · атом.

Ионную составляющую сварочного тока приблизительно можно вычислить из условия энергетического равновесия [14, 15/ на границе столб дуги — катодная область

$$i = \frac{U_{\text{к}}}{U_{\text{к}} + U_{\text{и}}},$$

где $U_{\text{и}}$ — потенциал ионизации газа, ЭВ.

При распылении металлов и окисных пленок сварочной дугой в исследуемом диапазоне сварочного тока коэффициент катодного распыления изменяется в широких пределах: $0,8 \cdot 10^{-2}$ до $1,7 \cdot 10^{-2}$ атом/ион при сварке в аргоне и от $1,9 \cdot 10^{-2}$ до $3,7 \cdot 10^{-2}$ атом/ион при использовании гелия в качестве защитного газа.

Зависимость ширины полосы распыления окисных пленок алюминия от режима сварки показана на рис. 2.4 [16/]. Сплошность следа, оставляемого катодным пятном на изделии, является показателем качественной очистки поверхности от окислов и загрязнений. За критерий качественной очистки принята полная смачиваемость жидким металлом (оловом) полосы распыления.

Из рис. 2.4 видно, что с увеличением скорости сварки ширина полосы очистки уменьшается, а с ростом тока увеличивается. Максимальная ширина полосы распыления дугой в исследованном диапазоне токов 30...100 А составляет 20...25 мм.

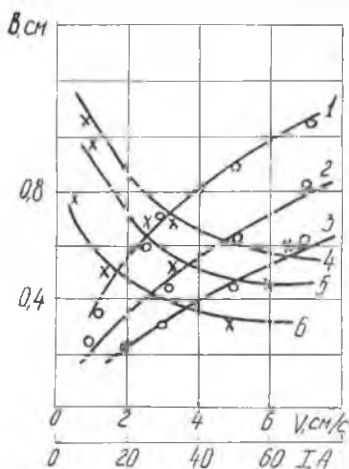


Рис. 2.4. Зависимость ширины полосы катодной очистки алюминия от режима: 1, 2, 3 — скорость сварки соответственно 0,6; 2,4; 6 см/с; 4, 5, 6 — ток соответственно 70, 50 и 30 А

2.5. ПОДГОТОВКА ПОВЕРХНОСТИ ПРОВОЛОКИ ПОД СВАРКУ

Известно, что на качество сварных швов значительно влияет состояние поверхности присадочной проволоки. Присадочная проволока подготавливается перед сваркой только химическим путем и включает следующие основные операции: обезжиривание, травление, дополнительную обработку поверхности после

травления с целью повышения плотности пленки и уменьшения запаса имеющейся в ней влаги.

Обезжиривание и травление проволоки проводят по технологии, принятой для обезжиривания и травления поверхности основного металла. Дополнительная обработка может быть различной: вакуумная сушка проволоки, химическое или электрохимическое полирование поверхности.

Электрохимическое полирование может производиться на установке МАТИ, схема которой показана на рис. 2.5 /4/. Проволока, предварительно обработанная в растворе NaOH, с кассеты 4 подходит к роликам 5 через ванну с электролитом 1. На проволоку 2 через мундштук 3 от источника постоянного тока подается положительный потенциал. В ванне на участке между катодом 6 проволока полируется, затем промывается водным душем 7, протирается в установке 8, обдувается горячим воздухом и наматывается роликами 9 на катушку 10.

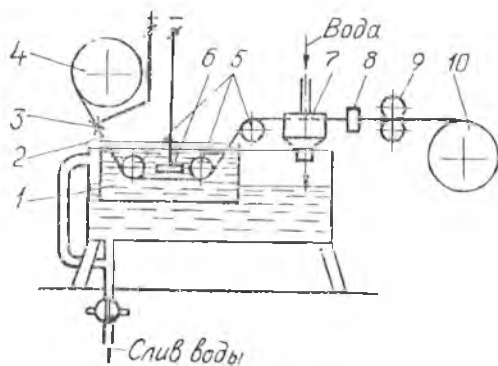


Рис. 2.5. Схема установки МАТИ для полирования проволоки

В качестве электролита использован раствор следующего состава: 700 мл H_3PO_4 , 300 мл H_2SO_4 , 42 г CrO_3 . Температура электролита в процессе полирования проволоки 95—100°C. При перегреве электролита свыше 100°C процесс полирования прекращается. Для каждого диаметра проволоки при постоянной скорости протяжки ее через ванну с электролитом существует минимальная величина тока, при котором возможен процесс полирования. Так, например, при скорости протяжки проволоки 100 м/ч электрополирование проволоки АМг6 диаметром 1,6 мм возможно при величине тока 19,8 А.

В ИЭС им. Е. О. Патона и на кафедре электрохимии Киевского политехнического института разработан новый эффективный способ подготовки поверхности проволоки под сварку /17/.

Способ заключается в обезжиривании в водном растворе едкого натрия в присутствии эффективных ингибиторов при 60...65°C и последующем химическом полировании при 90...150°C в водном растворе смеси ортофосфорной, азотной кислот с добавлением пассивирующих веществ, гидрофобизирующих обрабатываемую поверхность.

Введение в состав растворов для обезжиривания ингибиторов коррозии алюминия снижает скорость его растворения, но не препятствует удалению окисной пленки. Последнее способствует более равномерному травлению и сглаживанию поверхности металла.

При оптимальной концентрации реактивов и соответствующих режимах химического полирования поверхность металла более гладкая, блестящая, с весьма тонким окисным слоем.

В табл. 2.3 /17/ приведены результаты испытаний проволоки из сплава АМг6, обработанной различными способами на оптимальных режимах (выдержка от обработки до испытаний не превышала 8 час).

Таблица 2.3

Способ обработки	Поверхностный водород, см ³ /100	Относительная толщина окисного слоя, А	Шероховатость		Окисные включения в швах, %	Поверхность
			Высота неровности, мкм	Класс обработки		
Химическое травление	3,2	55	3,42	7	0,0063	Матовая
Механическая обработка	2,2	35	1,53	9	0,0048	Светлая
Катодное распыление	1,5	40	1,45	9	0,005	Блестящая
Электрополирование	2,6	35	0,79	10	0,0056	то же
Химическое полирование	1,5	25	0,83	10	0,005	»
Состояние поставки	6,2	150	1,69	8	0,025	Серая

Из всех способов химическое полирование по разработанной технологии обеспечивает наименьшее содержание поверхностного водорода и минимальную толщину окисного слоя. Чистота обработки поверхности у химически полированных образцов на три класса выше, чем после химического травления. Поверхность после химического полирования обладает высокой коррозионной стойкостью в нормальных атмосферных условиях, не теряет блеска в течение длительного времени, что объясняется наличием тонкой плотной защитной пленки.

Оценка качества поверхности проволоки после химического полирования может быть проверена емкостно-омическим методом /18, 19, 20/.

Металл покрытий пленок можно уподобить плоскому конденсатору и выразить емкость уравнением

$$C_x = \frac{\epsilon_0 \epsilon S R}{d},$$

где n_a и n_i — число атомов и ионов соответственно; q — концентрации раствора; ϵ — относительная диэлектрическая проницаемость пленки и адсорбционного слоя; S — площадь электрода; d — эффективное расстояние между обкладками конденсатора; R — фактор шероховатости.

Качество полирования считается хорошим, если пористость швов, выполненных аргонодуговой сваркой с применением указанной проволоки, была меньше $0,270 \text{ см}^3/100 \text{ г}$. Данная величина характеризует среднюю пористость сварных швов, полученных с применением электрополированной проволоки. Эталоном плохого полирования являлась поверхность проволоки Св-АМг6, протравленной в щелочи. Пористость швов, полученных с применением такой проволоки, превышала $0,450 \text{ см}^3/100 \text{ г}$. Емкость протравленной в щелочи (неполированной) проволоки равна $2,2...2,4 \text{ мкф/см}^2$, а сопротивление — $47...48 \text{ Ом/см}^2$. Емкость полированной проволоки меньше $1,4 \text{ мкф/см}^2$, а сопротивление больше 60 Ом/см^2 .

Зависимость пористости сварных швов от емкости поверхностного слоя химически полированной проволоки Св-АМг6 линейна. Уменьшение сопротивления протравленной проволоки по сравнению с полированной и рост пористости в соответствующих сварных швах объясняется тем, что адсорбированные в порах рыхлой пленки молекулы воды не удаляются при сушке.

В ИЭС им. Е. О. Патона разработана технология механизированной электрохимической очистки (ЭХО) поверхности сварочной проволоки в ваннах с бесконтактным биполярным токопроводом /21/. Все технологические операции (размотка проволоки, обезжиривание, электрохимическое полирование, промывка и сушка) осуществляются при непрерывной протяжке проволоки через соответствующие устройства специализированной установки, управление которой производится с централизованного пульта. Жидкостный токопровод биполярной ванны обеспечивает равномерное распределение плотности тока по длине проволоки, исключает электроэрозионное разрушение поверхности металла. Введение высокоэффективных поверхностно-активных веществ в состав электролита повышает чистоту обработки проволоки, увеличивает производительность про-

цесса ЭХО и позволяет вести качественное электрополирование при температурах (50...60)°С.

Двухнитевая установка ОБ 2175 для электрохимической очистки сварочной проволоки из алюминия или алюминиевых сплавов (рис. 2.6) состоит из размоточного 1 и натяжного 2 устройств, ванны щелочного обезжиривания 9, промывочных устройств 6 и 8, ванны электрохимической очистки 7, электродушища 5, намоточного устройства 4, пульта управления 3, источника питания переменного тока 10, шкафа управления 11 и стыковой сварочной машины 12 типа МС403.

Применительно к алюминиевым сплавам различных систем легирования разработанная ЭХО придает поверхности металла светлый блестящий вид. Электрохимически очищенная проволока содержит минимальное количество поверхностного водорода и обеспечивает высокую плотность металла швов. При длительном хранении проволоки от момента обработки до сварки перечисленные показатели изменяются менее заметно, чем для проволоки с травленной поверхностью (рис. 2.7). В процессе сварки проволока обеспечивает стабильное горение дуги, исключает разбрызгивание электродного металла и равномерное формирование швов.

3. УЛУЧШЕНИЕ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА ШВА И ПОВЫШЕНИЕ ГЕРМЕТИЧНОСТИ СОЕДИНЕНИЙ

3.1. МЕХАНИЗМ РАЗРУШЕНИЯ ОКИСНЫХ ПЛЕНОК НЕПОСРЕДСТВЕННО В ПРОЦЕССЕ ДУГОВОЙ СВАРКИ В СРЕДЕ ЗАЩИТНЫХ ГАЗОВ

Для сварки алюминиевых сплавов в среде защитных газов применяют аргон первого состава, гелий или смеси аргона с гелием. При сварке в защитных газах окисная пленка удаляется своеобразным воздействием электрического тока в процессе горения дуги. Механизм разрушения окисных пленок с поверхности свариваемых кромок при использовании защитных газов аргона и гелия не одинаков. Наиболее вероятный механизм воздействия электрического тока при аргонодуговой сварке состоит в том, что движущиеся с большой скоростью положительные ионы бомбардируют поверхность свариваемых кромок и сварочной ванны, разрушают пленку окиси и путем так называемого катодного распыления удаляют ее /12, 22, 23/.

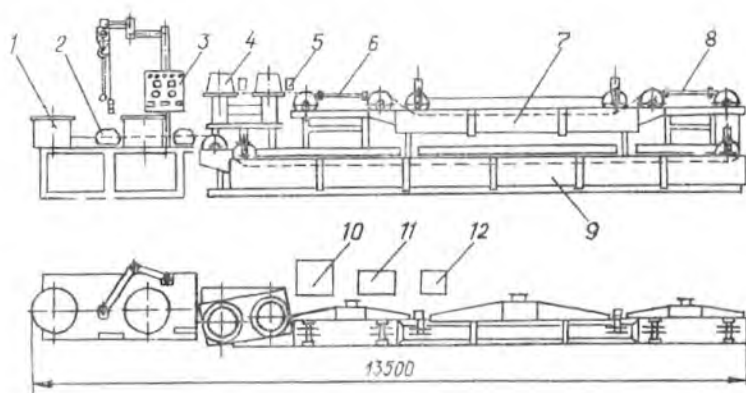


Рис. 2.6. Общий вид установки ОБ 2175 для электрохимической очистки сварочной проволоки

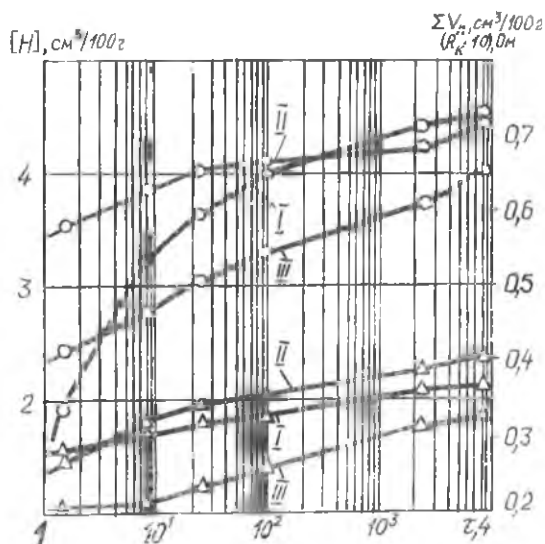


Рис. 2.7. Влияние длительности выдержки проволоки СВ-AMg6 $\varnothing 2$ мм на содержание водорода I, контактное сопротивление II и плотность швов III после электрохимической очистки ($\Delta - \Delta$) и химического травления ($\circ - \circ$)

При сварке постоянным током обратной полярности очищающее действие тока наблюдается на протяжении всего процесса горения дуги, а при сварке переменным током — только в те периоды, когда изделие является катодом.

При сварке вольфрамовым электродом вследствие большого выделения теплоты на аноде наблюдается чрезмерный перегрев его и повышенный расход. Для уменьшения расхода вольфрама необходимо питание дуги переменным током. При этом в полупериоды, когда катодом является вольфрам, происходит его охлаждение. При сварке на переменном токе удается сохранить достаточно высокую стойкость электрода и добиться удовлетворительного разрушения окисной пленки на детали.

Влияние полярности тока и защитного газа на допустимые токи вольфрамового электрода показано в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Род тока	Защитный газ	Сила сварочного тока (А) при диаметре электрода, мм		
		1—2	3	4
Постоянный прямой полярности	Аргон	65—150	140—180	250—340
	Гелий	50—110	100—140	200—300
Постоянный обратной полярности	Аргон	10—30	20—40	30—50
	Гелий	10—20	15—30	20—40
Переменный	Аргон	20—100	100—160	140—220
	Гелий	10—60	60—100	100—160

Условия горения дуги переменного тока при сварке вольфрамовым электродом в полупериоды разной полярности отличаются. В полупериод, когда вольфрам является катодом, благодаря мощной термоэлектронной эмиссии проводимость дугового промежутка возрастает, увеличивается ток и снижается напряжение дуги.

В полупериод, когда катодом становится изделие (холодный катод), проводимость дугового промежутка снижается, уменьшается сила тока дуги и возрастает напряжение. В результате этого синусоида тока дуги оказывается несимметричной, что равносильно действию в цепи дуги некоторой постоянной составляющей тока. Это явление объясняется различием условий существования дуги на электродах (различные в работах выходы φ_1 и φ_2 , разные температуры $T_{пл}$ и $T_{кип}$, разные формы электродов и разный теплопровод от них).

В табл. 3.2 приведены значения ΔU (разности напряжений на прямой и обратной полярности) для некоторых пар электродов. Напряжение на них всегда ниже в те полупериоды, когда катодом являются наиболее тугоплавкие и испаряющиеся при более высоких температурах электроды.

Несимметрия напряжения дуги порождает несимметрию тока и его постоянную составляющую. Например, при аргодуговой сварке алюминия вольфрамовым электродом относительная асимметрия токов $\Delta i = i_W - i_{Al}$ может достигать 50% от значения i_W и более. В этом случае стационарная термоэлектронная эмиссия с W-катодом и его остаточная эмиссия значительно больше, чем с «холодного» Al-катода по трем основным причинам: 1) $T_{пл}^W \sim 4000 \text{ K} \gg T_{пл}^{Al} \sim 950 \text{ K}$; 2) катодное падение напряжения U_k^{Al} значительно больше, чем U_k^W ; 3) теплоотвод в массивное алюминиевое изделие больше, чем в вольфрамовый стержень.

Таблица 3.2

Пары электродов		Значения $\Delta U, \text{ В}$
катод	анод	
W	Fe	7 ± 1
W	Cu	9 ± 1
W	Al	10 ± 1
W	Ti	5 ± 1
W	Mo	2 ± 1
C	Fe	6 ± 1
C	Cu	8 ± 1
Ti	Fe	3 ± 1
Ti	Al	4 ± 1

С увеличением составляющей постоянного тока нарушается стабильность процесса сварки, резко ухудшается чистота поверхности шва, появляются подрезы, чешуйчатость и другие дефекты, снижающие прочность сварных соединений и пластичность металла шва.

Поэтому при сварке неплавящимся электродом для устранения или уменьшения постоянной составляющей в сварочную цепь вводится емкостное сопротивление, а для облегчения повторного зажигания дуги добавля-

ется индуктивное сопротивление, что приводит к сдвигу фаз между напряжением холостого хода источника питания и током дуги. Повторное зажигание дуги облегчается, поскольку в этом случае в момент перехода тока через нулевое значение напряжение холостого хода не равно нулю. Однако этих мер оказывается недостаточно для повышения стабильности горения дуги при сварке алюминиевых сплавов. Большое различие свойств основного металла и электрода приводит к тому, что имеет место практически полное выпрямление сварочного тока, несмотря на наличие в цепи индуктивности. В связи с этим для сварки неплавящимся электродом алюминиевых сплавов применяются в большинстве случаев специализированные источ-

ники питания, имеющие специальную аппаратуру для повышения стабильности горения дуги.

Разрушение описанных плен на поверхности свариваемых кромок и сварочной ванны при гелиево-дуговой сварке неплавящимся электродом в отличие от аргонодуговой сварки происходит при прямой полярности, при которой развивается термический механизм разрушения плен /24/. Вместе с тем, разрушение окисной пленки на поверхности ванны еще не избавляет от основного недостатка при сварке алюминиевых сплавов — окисных включений в металле шва, которые являются следствием неразрушенных плен на торцах свариваемых деталей /25/. Основная роль в механизме разрушения плен отводится движению расплавленного металла ванны /26/.

Некоторые авторы не исключают возможности оседания плен на дно жидкой ванны /27/, так как при сварке алюминиевых сплавов неплавящимся электродом переменным током механическое воздействие дуги незначительно и перемещение жидкого металла в нижней части сварочной ванны имеет ламинарный характер /28/.

Наиболее надежным и технологичным является стыковое соединение с проплавом, по высоте близким к толщине свариваемых листов. В этом случае металл проплава заполняет углубление формирующей канавки в подкладке. Форма и размеры формирующей канавки оказывают большое влияние на качество соединений при сварке неплавящимся электродом /29/.

При нормальном ведении процесса формирования обратной стороны шва происходит по схеме, показанной на рис. 3.1. При малой глубине канавки в корневой части шва, как правило, образуется несплавление. Это связано с тем, что в момент касания металла проплава с холодной подкладкой (рис. 3.1, а) он быстро охлаждается, и дальнейшее течение оказывается возможным лишь в стороны от оси канавки. Однако при таком течении металла пленка на торцевых поверхностях свариваемых листов не разрушается (рис. 3.1, б). Сварка на повышенных режимах не устраняет несплавления и часто при-

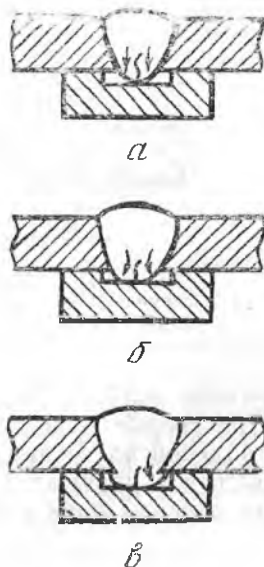


Рис. 3.1. Схема образования проплава с прямоугольной канавкой (стрелками показано направление течения металла в разные моменты заполнения канавки)

водит к образованию дополнительных дефектов в корневой части шва — протеканию проплава на основной металл по порты типа свищей, возникающих при непосредственном контакте жидкого металла с поверхностью подкладки (рис. 3.1, в). Натекание, так же как и несплавление, способствует концентрации напряжений и при работе в активной среде может служить очагом коррозии.

Для устранения несплавления и натеканий, а также остатков неразрушенной пленки, в корневой части швов при сварке металла толщиной 1...3 мм неплавящимся электродом желательнее добиваться получения проплава по высоте, близкой к толщине свариваемых листов. Это может быть достигнуто при использовании формирующей канавки, показанной на рис. 3.2. Размеры этой канавки для

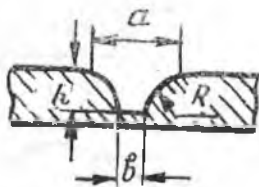


Рис. 3.2. Подкладка, обеспечивающая формирование центральной части проплава на весу



а



б



в

Рис. 3.3. Схема образования проплава при сварке, обеспечивающей формирование центральной части проплава на весу

различных толщин свариваемого металла показаны в табл. 3.3.

При сварке на такой подкладке в связи с формированием центральной части проплава на весу увеличивается его размер по высоте и улучшаются условия разрушения и удаления из стыка окисных плен в процессе течения металла (рис. 3.3 а, б).

Таблица 3.3

Толщина свариваемого металла, мм	a	b	R	h
2...3	7,0	2,0	2,5	2,5
4...6	9,0	2,0	4,2	3,5

Изменение направления течения металла от периферии к оси подкладки позволяет сваривать на повышенных режимах без напеканий (рис. 3.3 в).

Окисные пленки на торцевой поверхности деталей разрушаются и удаляются в основном в результате движения металла шва при заполнении им формирующей подкладки.

ПЕРЕМЕННЫМ АСИММЕТРИЧНЫМ ТОКОМ 3.2. СВАРКА ВОЛЬФРАМОВЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

Работами ИЭС им. Е. О. Патона установлена возможность расширить технологический диапазон аргонодуговой сварки неплавящимся электродом алюминиевых сплавов. Такая возможность реализована 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 и, следовательно, дополнительному расширению пределов свариваемых толщин. Преобладание тока обратной полярности улучшает очистку свариваемого металла от окисной пленки и улучшает качество формирования шва.

Характеристиками асимметричного тока является сила тока прямой и обратной полярности, а также коэффициент асимметрии K_a , определяемый отношением среднего значения составляющей тока прямой $I_{пр ср}$ полярности к сумме средних значений токов прямой и обратной $I_{обр ср}$ полярности /30/

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

Действующее значение асимметричного тока и коэффициент 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 однопроходной сварки стыковых соединений из алюминиевых сплавов асимметричным током промышленной частоты приведены в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Толщина металла, мм	Среднее значение тока, А		Сварочный ток, А	Скорость сварки, м/ч	Коэффициент асимметрии	Диаметр вольфрамового электрода, мм	Расход аргона, л/мин
	прямой	обратный					
3—4	65—85	85—65	160—200	15—20	0,45—0,35	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 $I_{обр\ р}$ тока приведены средние значения, замеренные магнитоэлектрическим прибором.

3.3. СВАРКА ТРЕХФАЗНОЙ ДУГОЙ ВОЛЬФРАМОВЫМ ЭЛЕКТРОДОМ

Трехфазная дуга отличается высокой устойчивостью горения и более высокой, по сравнению с однофазной, производительностью процесса за счет повышения проплавливающей способности. Использование трехфазной дуги при той же стойкости вольфрамовых электродов позволяет повысить мощность теплового потока в 1,5...2 раза /30/.

При сварке трехфазной дугой имеется возможность в широких пределах регулировать характер тепловложения в кромки за счет перераспределения мощности путем изменения соотношения тока между электродами и деталью, изменения угла между электродами, изменения положения электродов относительно плоскости стыка. Наибольшее проплавление стыка при сохранении достаточной устойчивости горения дуги достигается при отношении тока между электродами к току между электродами и деталью, равном 1,5...1,7. Широкие возможности регулирования теплового потока трехфазной дуги открывают перспективы для сварки алюминия и его сплавов в довольно широком диапазоне толщин.

При последовательном расположении электродов достигается большая глубина проплавления, при параллельном получают широкие швы с малой глубиной проплавления. При сварке металла толщиной более 10 мм целесообразно расположение электродов вдоль стыка. При этом желательно, чтобы задний электрод был выше переднего на 3...4 мм. Такое расположение электродов обеспечивает наибольшую глубину проплавления и наиболее благоприятные условия кристаллизации

металла шва. Тепловой поток от приподнятого заднего электрода распространяется в большей степени над поверхностью листов, уменьшая скорость кристаллизации хвостовой части ванны. Высокое качество соединений, получаемых при сварке трехфазной дугой, в значительной степени определяется хорошим перемешиванием металла в сварочной ванне и дроблением окисных пленок.

Трехфазную дугу используют в основном для автоматической сварки стыковых соединений в нижнем положении. Без разделки кромок за один проход сваривают металл толщиной до 30 мм. Ориентировочные режимы односторонней автоматической сварки трехфазной дугой стыковых соединений алюминиевых сплавов приведены в табл. 3.5.

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.

Таблица 3.5

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

3.4. ПЛАЗМЕННАЯ СВАРКА (СЖАТОЙ ДУГОЙ) ПОСТОЯННЫМ ТОКОМ ОБРАТНОЙ ПОЛЯРНОСТИ

Высокая плотность тока в столбе дуги, большая концентрация энергии при плазменном процессе позволяют повысить скорость сварки, уменьшить зону термического влияния и 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.

Вольфрамовый электрод для повышения его стойкости в плазмотроне запрессовывают в охлаждаемую медную обойму. Рабочий конец вольфрамового электрода должен быть чистым и заточен залоплывцом с медной обоймой. Глубина погружения медно-вольфрамового электрода относительно среза формирующего сопла составляет 1,5...2,5 мм. При более глубоком погружении электрода в сопло затрудняется возбуждение дежурной дуги, а также возбуждение и горение основной дуги. Длина факела дежурной дуги поддерживается в пределах 5...8 мм. Режимы плазменной сварки стыковых соединений из алюминия приведены в табл. 3.6.

Таблица 3.6

Форма подготовки кромок, характер выполняемого шва	Толщина металла, мм	Диаметр отверстия плазмоформирующего сопла, мм	Сварочный ток, А	Диаметр присадочной проволоки, мм	Расход защитного аргона, л/мин	Скорость сварки, м/ч	Число проходов
Без скоса кромок	4	6,0	100—140	2	6—8	10—12	1
односторонний, на	8	7,5	170—290	3	10—14	5—6,5	2
съёмной подкладке	12	7,5	280—340	3	10—14	5—6,5	2

Примечание. Расстояние между соплом и изделием при сварке без скоса кромок 12—16 мм; расход плазмообразующего аргона 1,2—2 л/мин; напряжение дуги 38—42 В.

Для плазменной сварки алюминия на постоянном токе обратной полярности рекомендуется применять установки типа УПС 501У4 (токи до 500 А) и УПС 901У3 (токи до 800 А). Эти установки состоят из механизма перемещения плазмотрона, сварочного выпрямителя и блока управления.

В ИЭС им. Е. О. Патона осуществлена разработка оборудования и технология для микроплазменной сварки при нормальном и низком давлении (рис. 3.4) /31/.

Алюминий и его сплавы сваривают асимметричным синусоидальным током промышленной частоты или разнополярными прямоугольными импульсами регулируемой частоты. Благодаря высокой степени сжатия столба дуги при микроплазменной сварке асимметричным переменным током концентрация

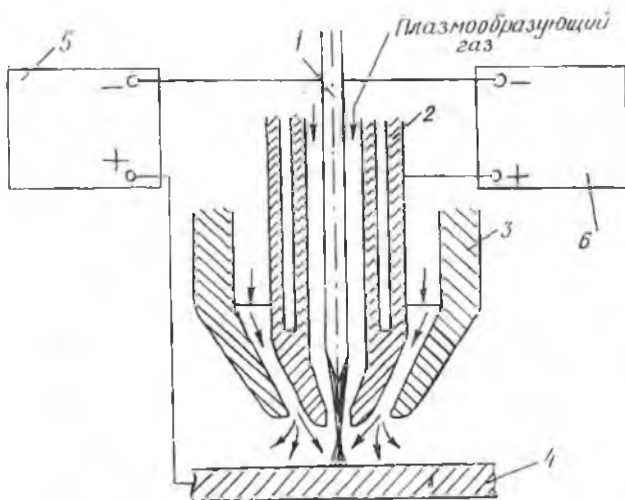


Рис. 3.4. Схема микроплазменной сварки: 1 — вольфрамовый электрод; 2 — медное охлаждаемое сопло; 3 — керамическое сопло; 4 — изделие; 5 — источник питания микроплазмы, 6 — источник питания дежурной дуги

энергии источника нагрева более высокая, чем при аргонодуговой сварке, обеспечивается меньшая ширина шва, более высокая глубина проплавления и более узкая зона термического влияния. Поскольку при микроплазменной сварке катодное пятно не только очищает открытые поверхности торца стыкуемых кромок, но и проникает в зазор между свариваемыми кромками, в данном случае получают высококачественные торцевые швы без окисных включений с достаточной глубиной проплавления.

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. 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.

В качестве плазмообразующего газа используют аргон, а защитного — гелий. Гелий, защищая сварочную ванну от атмосферных газов, затрудняет развитие фронта понижения в радиальном направлении и, дополнительно сжимая дугу, делает ее просторанственно 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.

Форма проплавления шва существенно зависит от параметров режима сварки. При увеличении сварочного тока и длины дуги глубина проплавления пропорционально повышается. Однако швы при этом формируются с наплывами и другими дефектами. Ориентировочные режимы микроплазменной сварки алюминия и его сплавов переменным током промышленной частоты и сплава АМгб разнополярными прямоугольными импульсами приведены соответственно в табл. 3.7 и 3.8 /31/.

В качестве источников питания для ручной и автоматической микроплазменной сварки алюминия и его сплавов используют аппаратуру асимметричного переменного тока А 1281У, а для автоматической сварки разнополярными прямоугольными импульсами — аппараты типа 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 для аргонодуговой сварки, которые обеспечивают стабильное и точное перемещение горелки по линии сварки.

3.5. ОСОБЕННОСТИ ГЕЛИЕВО-ДУГОВОЙ СВАРКИ ВОЛЬФРАМОВЫМ ЭЛЕКТРОДОМ НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ ПРЯМОЙ ПОЛЯРНОСТИ

Сварка на постоянном токе прямой полярности представляет значительный интерес с точки зрения увеличения проплавляющей способности дуги и возможности форсирования режимов сварки. При этом требуется обеспечить достаточную для получения доброкачественного соединения очистку металла шва от окислов.

С этой целью в ИЭС им. Е. О. Патона проведена работа /32/ по сварке алюминиевых сплавов дугой постоянного тока прямой полярности. В качестве защитных газов были использованы гелий, аргон и их смеси. Применение гелия и его смеси с аргоном обеспечивает хорошую защиту металла шва.

Таблица 3.7

Марка сплава	Толщина металла, мм	Среднее значение тока, А		Напряжение дуги, В	Скорость сварки, м/ч	Диаметр вольфрамо- вого элект- рода, мм	Расход газа, л/мин	
		прямой $I_{пр}$ ср	обратный $I_{обр}$ ср				аргон	гелий
А 5 АМг6	0,3	12—15	8—10	16—18	25—30	1,0	0,15—0,2	2—3
	0,5	8—10	6—8	20—22	22—26	1,0—1,5	0,2—0,25	2—3
	1,0	22—26	16—18	22—24	20—24	1,0—1,5	0,25—0,3	3—4
А 5 АМг6	0,5	16—18	10—12	22—24	18—24	1,5—2,0	0,3—0,35	4—5
	1,0	30—46	22—25	20—24	20—24	1,0—1,5	0,25—0,3	3—4
А 5 АМг6	1,0	30—34	18—22	22—24	18—24	1,5—2,0	0,3—0,35	4—5
	1,5	50—60	25—30	22—24	18—24	1,5—2,0	0,3—0,35	4—5
АМг6	1,5	40—50	20—25	22—24	18—24	1,5—2,0	0,3—0,35	4—5

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

Таблица 3.8

Марка сплава	Толщина металла, мм	Среднее значение тока, А		Длительность импуль- са, с, полярность		Скорость сварки, м/ч	Диаметр вольфрамо- вого элект- рода, мм	Расход газа, л/мин	
		$I_{пр}$	$I_{обр}$	прямая $t_{пр}$	обратная $t_{обр}$			аргон	гелий
А 5	0,3	10—12	8—10	0,02	0,04	25—30	1,0	0,15—0,2	2—3
	0,5	20—25	15—20	0,02	0,03	25—30	1,0	0,2—0,25	2—3
	1,0	40—50	18—20	0,04	0,04	20—25	1,0	0,25—0,3	3—4
АМг6	1,0	35—40	16—18	0,06	0,06	20—25	1,5	0,3—0,35	3—4
	1,5	70—80	25—30	0,08	0,08	15—20	1,5	0,35—0,4	4—5
АМг6	1,5	60—70	20—25	0,08	0,08	15—20	1,5	0,35—0,4	4—5
	2,0	110—130	30—40	0,08	0,08	15—20	1,5	0,35—0,4	4—5
АМг6	2,0	90—110	30—35	0,08	0,08	15—20	2,0	0,35—0,4	4—5

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

По теплофизическим свойствам гелий существенно отличается от аргона. Он имеет высокий потенциал ионизации (24,5 вместо 15,7 ЭВ) и в 10—15 раз большую теплопроводность при температурах плазмы. Кроме того, он легче аргона примерно в 10 раз. Достаточная для дуги ионизация аргона при $n \approx 10^{17}$ ионов/см³ наступает примерно при 16000° К, в то время как для гелия — при 25000° К. Все эти особенности существенно влияют на свойства W-дуги в гелии. Например, добавление к аргону гелия превращает постепенно конусную дугу в сферическую /33/ (рис. 3.5 а). Пинчэффект в гелиевой плазме практически не имеет места до весьма больших плотностей тока, так как значительная теплопроводность гелия дает низкий температурный градиент по радиусу столба и весьма высокое внутреннее давление.

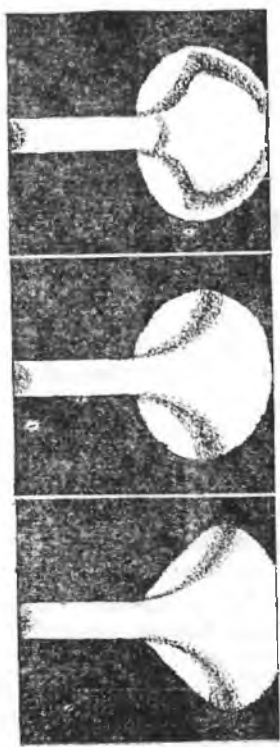
Высокий средний градиент напряжения в плазме гелия, достигающий $E = 2$ В/мм против $E = 0,8 — 1,2$ В/мм в аргоне, обуславливает высокое напряжение на дуге (рис. 3.5 б).

При этом процесс разрушения окисной пленки зависит от длины дугового промежутка. Весьма малое расстояние между катодом и анодом дает возможность использовать для указанной цели энергию электронов, аналогично электроэрозивной обработке металлов. Кроме того, при сварке короткой дугой с частичным погружением ее в соединяемый металл окисная пленка разрушается и под воздействием излучения /34/.

При замене аргона гелием возрастает глубина проплавления. Сварку неплавящимся электродом легче всего осуществлять в гелии высокой чистоты (99,9%).

Сварные швы на алюминиевых сплавах, выполненные на постоянном токе прямой полярности в гелии без присадочной проволоки, имеют обычно ровную блестящую поверхность. При использовании присадочной проволоки поверхность тусклая, покрыта легко удаляемым серым налетом. Хорошая защита металла шва обеспечивается при применении горелок А-954 и А-1272 конструкции ИЭС. Сварка на постоянном токе прямой полярности осуществляется достаточно концентрированным источником нагрева. Ее можно вести в широком интервале скоростей при малой погонной энергии.

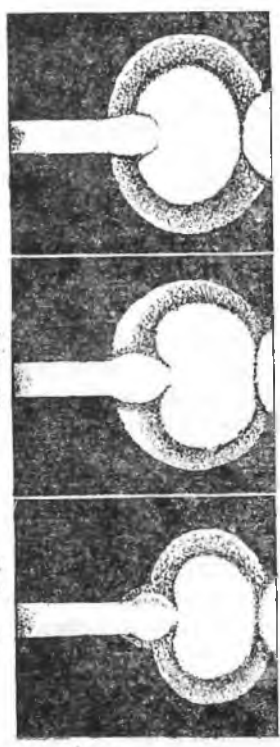
На структуру и свойства металла шва оказывает также влияние продолжительность пребывания металла ванны в жидком состоянии и его охлаждение от момента начала кристаллизации до полного затвердевания. При сварке на постоянном токе прямой полярности длительность пребывания металла в жидком состоянии значительно меньше, чем при сварке на переменном токе. Сокращается область основного металла, околшовоной зоны и время его пребывания при повышенных температу-



Ar 100%
He 0%

Ar 85%
He 15%

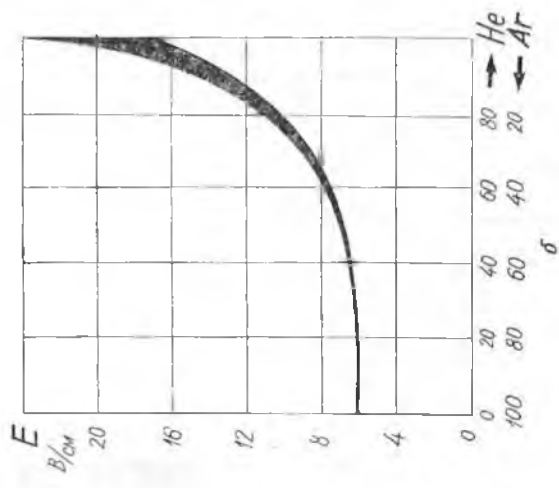
Ar 75%
He 25%



Ar 50%
He 50%

Ar 25%
He 75%

Ar 15%
He 85%

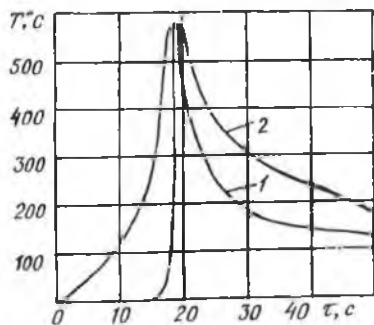


а

б

Рис. 3.5. Изменение формы плазмы W-дуги (а) и напряженности (δ) в зависимости от состава смеси аргон—гелий при токе 100 А

рах (рис. 3.6 а). Это способствует формированию узких швов (рис. 3.6 б, в), сужается зона теплового воздействия дуги. Если при сварке на переменном токе коэффициент использования тепла дуги составляет $\sim 0,55$, то при постоянном токе прямой полярности он возрастает до 0,8.



а

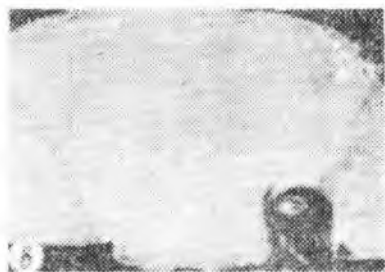


Рис. 3.6. Термические циклы и макро-структура швов на сплаве Д20 при $S = 6$ мм (а), выполненных: на постоянном токе прямой полярности (б); аргонодуговой сваркой на переменном токе (в)

Источники питания должны обеспечивать напряжение холостого хода 60—65 В. Для сварки используют выпрямители ВСВУ, ВДУ или генераторы с падающей характеристикой.

Указанным способом выполняют стыковые соединения без разделки кромок. Односторонняя сварка изделий предусматривает проплавление кромок на всю толщину и формирование усилия с обратной стороны шва.

Для сварки соединений толщиной до 12 мм необходима симметричная конусная заточка вольфрамового электрода с углом в вершине 90° (рис. 3.7 а). Для сварки больших толщин применяют заточку с эксцентричным смещением конуса электрода в сторону направления сварки (рис. 3.7 б). Подобная заточка электрода смещает дугу 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. 3.9) /30/.

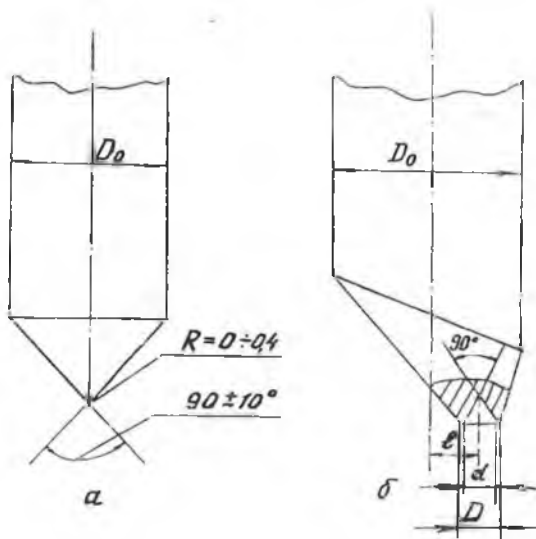


Рис. 3.7. Формы и размеры рабочего торца неплавящегося электрода

Таблица 3.9

Толщина металла, мм	Диаметр наружной заточки электрода, D_0 , мм	Диаметр наружной заточки, D , мм	Диаметр внутренней заточки, d , мм	Эксцентриситет, l , мм
3—5	3	—	—	—
5—6	4	—	—	—
6—8	5	—	—	—
8—12	6	—	—	—
8—12	5	2	1,2	1
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, до 3 мм $\varnothing = 2$ мм, до 4—10 мм $\varnothing = 2—2,5$ мм.

С помощью описанного способа получены высококачественные соединения алюминиевых сплавов толщиной 3, 8, 10, 15 и 20 мм, выполненные за один проход без разделки кромок. Ори-

ентировочные режимы односторонней сварки приведены в табл. 3.10.

Таблица 3.10

Толщина металла мм	Сварочный ток, А		Скорости сварки, м/ч	Расход гелия, л/мин.	Примечание
	Сплав				
	1201	АМг6			
4	100—140	140—160	15—30	15—20	Сварка с присадочной проволокой
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	Сварка без присадочной проволоки
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.

3.6. СВАРКА ПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ

Электрическая дуга горит между изделием и плавящимся электродом, который подается в зону дуги обычно с постоянной скоростью. Плавящийся электрод применяют при сварке алюминиевых сплавов толщиной более 3 мм. Для более тонкого металла не удастся добиться устойчивого горения дуги при мелкокапельном струйном переносе металла. Экономическая целесообразность применения сварки плавящимся электродом возрастает с увеличением толщины металла, глубокое проплавление которого обеспечивает процессу высокую производительность. Этим способом сварки удастся получить надежное проплавление корня шва при сварке тавровых и нахлесточных соединений.

Сварку плавящимся электродом в защитных газах выполняют на постоянном токе обратной полярности, при которой обеспечивается разрушение окисной пленки на кромках за счет катодного распыления и нормальное формирование швов.

Источники питания сварочной дуги должны иметь жесткую (проволока диаметром до 2,5 мм) или пологопадающую (проволока диаметром более 2,5 мм) внешнюю характеристику.

Преимущества процесса сварки плавящимся электродом: хорошее перемешивание ванны, меньшая вероятность получения

и металле швов крупных окисных включений. Вместе с тем, при сварке в аргоне плавящимся электродом диаметром до 2,5 мм трудно избежать образования пор в металле шва.

При сварке плавящимся электродом важнейшим процессом, определяющим его стабильность и качество формирования шва, является процесс формирования капель на электроде и перенос их в ванну. Этим требованиям отвечает разработанный в ИЭС им. Е. О. Патона способ импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом. Этот способ отличается от обычного 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. Наиболее целесообразен с точки зрения управления процесс, при котором каждый импульс тока приводит к отрыву только одной капли. 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, но обеспечивается надежная очистка поверхности ванны от окисных пленок. Импульсно-дуговая сварка позволяет выполнять сварку в различных пространственных положениях (вертикальном, горизонтальном и потолочном).

Импульсное изменение тока оказывает воздействие на ванну жидкого металла, способствуя получению более мелкой структуры металла шва, плавных очертаний валиков швов с мелкочешуйчатым строением. По-видимому, импульсное воздействие дуги на ванну должно способствовать лучшему дроблению окисных пленок и более полному протеканию реакций взаимодействия поверхности влаги, имеющейся на электродной проволоке, с металлом на стадии формирования капли. Эти особенности импульсной сварки плавящимся электродом очень важны с точки зрения сокращения пористости в металле швов и предупреждения дефектов, вызванных залеганием окисных пленок, то есть при этих условиях обеспечивается повышение механических свойств наплавленного металла и сварных соединений в целом, улучшается стабильность процесса.

Импульсно-дуговая сварка позволяет использовать проволоку диаметром 0,8—1 мм и получать соединения металла мини-

мальной толщины 1—3 мм, существенно стабилизировать провар корня шва.

Конструкция механизма подачи должна обеспечить надежное и стабильное поступление мягкой алюминиевой проволоки столь малых диаметров. Обычно в таких механизмах предусматривают две пары ведущих и прижимных роликов, что уменьшает проскальзывание проволоки и ее сминание. Ролики применяют без насечек. Внутренняя поверхность стальной трубки в горелке, по которой движется проволока, должна быть обработана с максимальной чистотой. Токоподводящие наконечники должны обеспечить надежный токосъем и хорошие условия скольжения проволоки. Сопло горелки должно обеспечивать надежную защиту газом жидкой сварочной ванны. Диаметр сопла горелок для автоматической сварки должен быть 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. 3.8).

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 аргоном гелий повышает концентрацию энергии в приэлектродных пятнах и обуславливает более высокий градиент температур в

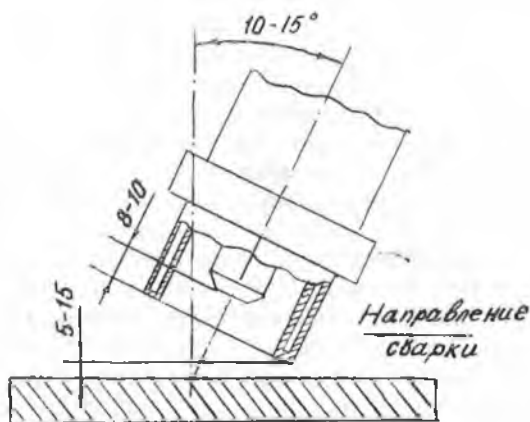


Рис. 3.8. Расположение горелки при автоматической сварке плавящимся электродом

столбе дуги. Применение смеси защитных газов повышает тепловую мощность дуги, температуру сварочной ванны. Особенно эффективно применение гелия для сварки алюминия высокой технической чистоты, теплопроводность которого выше по сравнению с алюминиевыми сплавами. При введении гелия в настроенную на аргоне 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 возрастает 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 (20—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. Ориентировочный режим автоматической и полуавтоматической импульсно-дуговой сварки плавящимся электродом в аргоне приведен в табл. 3.11, а в смеси аргона и гелия — в табл. 3.12.

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

3.7. ВЛИЯНИЕ ПОГОННОЙ ЭНЕРГИИ НА КАЧЕСТВО СОЕДИНЕНИЙ ПРИ АРГОДУГОВОЙ СВАРКЕ НЕПЛАВЯЩИМСЯ ЭЛЕКТРОДОМ

Большинство дефектов литой структуры сварных швов возникает на этапе кристаллизации, поэтому управление качеством сварных швов должно осуществляться, прежде всего, на этой стадии образования сварного соединения. Наличие интенсивных потоков расплава в сварочной ванне, определяемых давлением столба дуги, разницей гидростатических давлений в головной

Таблица 3.11

Подготовка кромок, характер выпольненного шва	Толщина металла, мм	Диаметр электродной проволоки, мм	Переменное напряжение на ИУП-1, В	Напряжение холостого хода на ИУП-1, В	Среднее значение напряжения дуги, В	Среднее значение сварочного тока, А	Число импульсов тока, А/ки, м/ч	Скорость подачи проволоки, м/ч	Расход аргона, л/мин
Без скоса кромок	1,0	0,8	100	19	17,5—18	65—70	50	50	10—12
Односторонний	2,0	1,0	100	21	17,5—18	75—80	50	50	10—12
На съёмной подкладке	3,0	1,6	100	21	17,5—18	100—105	50	45	12—14
	4,0	1,6	90	23	19—20	140—150	100	35	12—14
	5,0	1,6	90	20—21	—	160—170	100	30	12—14

Таблица 3.12

Подготовка кромок стыкового двустороннего шва	Толщина металла, мм	Диаметр электродной проволоки, мм	Сварочный ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость подачи проволоки, м/ч	Расход газов в смеси л/мин		
						Скорость сварки, м/ч	Аргон Гелий	
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	2,5	440—480	32—35	290—320	15—17	16—18	48—52
	22	3,15	450—490	32—35	210—235	16—18	16—18	48—52

и хвостовой частях ванны и конвективным обменом в ней, само обеспечивает перемешивание расплава. Такое перемешивание является как бы естественной характеристикой качественных показателей сварного соединения по механическим свойствам и герметичности при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом. Однако при общем удовлетворительном качестве сварных швов, выполненных в производственных условиях, в отдельных случаях не обеспечивают герметичности соединений. При установившемся технологическом процессе сварки конструкций из алюминнево-магниевого сплавов толщиной 1...6 мм и при установившейся методике подготовки свариваемых кромок и присадочной проволоки количество течей в расчете на 1 м шва в среднем составляло около 0,002 /35/. Такой показатель течей в общем-то невелик, однако при изготовлении ответственных конструкций на предотвращение этого вида дефектов должно быть обращено особое внимание, поскольку они снижают надежность конструкции. Кроме того, необходимость повторных испытаний существенно повышает трудоемкость изготовления конструкций.

Улучшение структуры металла шва достигается за счет управления процессом его кристаллизации и измельчением первичной структуры. Структура, а следовательно, и свойства металла сварных соединений, в свою очередь, зависят от погонной энергии при сварке. Показателем погонной энергии служит отношение сварочного тока к скорости сварки.

Влияние погонной энергии на качество сварного соединения прослеживается по таким характеристикам структуры и свойств металла, как изменение среднего количества зерен на единицу площади n , предела прочности σ_b , удельной работы разрушения шва a_{-y} , герметичности $A_{пр}/36/$.

Увеличение скорости сварки приводит к интенсивной перестройке схемы кристаллизации, что выражается в уменьшении зоны характерного для швов алюминиевых сплавов осевого кристаллита и замене его на кристаллиты вытянутой формы в направлении сварки. Перестройка схемы кристаллизации заканчивается при скорости сварки, равной 20 м/ч. Дальнейшее увеличение скорости сварки выражается в уменьшении размера этих зерен.

Изменение прочности и удельной работы-разрушения металла шва в зависимости от величины погонной энергии находится в определенной корреляционной связи между изменением величины структуры зерна и свойствами металла шва.

Герметичность металла шва, оцениваемая (по методике МАТИ) эмпирическим критерием $A_{пр} = A K_p K_s$, где $A_{пр}$ — приведенное количество течей; A — фактическое количество те-

чей; K_p и K_s — поправочные коэффициенты, учитывающие зависимость числа течей от величины давления и толщины испытуемого образца соответственно.

Герметичность обусловлена наличием макродефектов типа окисных плен и пористости. При отсутствии макродефектов причиной негерметичности являются газовые микронесплошности, наличие и величина которых зависит от скорости кристаллизации, на что, в свою очередь, влияет уровень энергозложения. Снижение погонной энергии благоприятно воздействует на уменьшение размеров микронесплошностей, приводящих к течам.

Итак, следует отметить, что уменьшение энергозложения при сварке сплавов АМгб и 1201 в области скоростей 8...24 м/ч приводит к уменьшению величины зерен структуры, увеличению прочностных свойств, удельной работы разрушения и повышению герметичности металла швов (при $V_{св} > 20$ м/ч).

3.8. СВАРКА С ПРЕРЫВИСТОЙ ПОДАЧЕЙ ПРИСАДОЧНОЙ ПРОВОЛОКИ

Периодическая подача в сварочную ванну порций холодного металла обеспечивает термический цикл с принудительной прерывистой послойной кристаллизацией. В паузы между подачей присадочной проволоки возрастает глубина вогнутой поверхности сварочной ванны, оголяется ее передний фронт, вследствие чего облегчается катодное распыление окисных пленок, исключается патек расплавленного металла на холодную основу. Волнообразные перемещения жидкого металла в этом процессе сварки способствуют его дегазации.

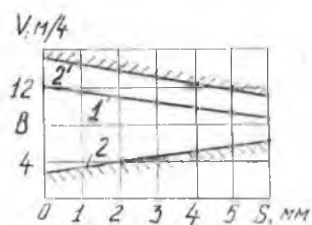


Рис. 3.9. Диапазон скоростей сварки с прерывистой подачей присадочной проволоки: 1 — оптимальная скорость сварки; 2 — граница эффекта слоистой кристаллизации

Разработанная в отрасли технология сварки внедрена в производство, для чего разработана и изготовлена специальная приставка прерывистой подачи присадочной проволоки.

Значения параметров режима, обеспечивающие наилучшие характеристики свойств и формирования швов при аргодуговой сварке алюминий-магниевого сплава с прерывистой подачей проволоки, приведены в табл. 3.13, а диапазон скоростей показан на рис. 3.9 /35/.

Таблица 3.13

Толщина свариваемо- го металла, мм	Скорость сварки, м/ч	Сварочный ток, А	Импульсность по- дачи присадочной проволоки, с	
			Подача	Пауза
1	12	60—70	0,3	0,3
2	11	100—110	0,3	0,4
4	10	150—170	0,4	0,4
6	9	270—290	0,4	0,5

Изготовление конструкций с использованием сварки с прерывистой подачей присадочной проволоки при прочих одинаковых условиях сборки и испытания обеспечило снижение количества течей в 15...20 раз и соответственно — существенный экономический эффект.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бельский В. Л., Власов И. П., Зайцев В. Н. и др. Конструкция летательных аппаратов. — М.: Оборонгиз, 1963. — 709 с.
2. Березков В. В., Буров М. Н., Зиберов В. К. и др. Конструкция управляемых баллистических ракет. — М.: Воениздат, 1969. — 444 с.
3. Дударь Л. А., Китаев Ф. И., Рудман М. Д. Сборочно-сварочные работы в производстве летательных аппаратов. — Куйбышев: КуАИ, 1983. — 96 с.
4. Технология и оборудование сварки плавлением. /Под ред. Г. Д. Никифорова. — М.: Машиностроение, 1978. — 327 с.
5. Никифоров Г. Д. Металлургия сварки плавлением алюминиевых сплавов. — М.: Машиностроение, 1972. — 264 с.
6. Радии А. Я. Исследование кинетики окисления жидкого алюминия. — В кн.: Вопросы технологии литейного производства, Труды МАТИ, № 49. — М.: Оборонгиз, 1961, с. 73—77.
7. Оботуров В. И., Толкачев Ю. И. Некоторые особенности образования и разрушения окисных плен при аргонодуговой сварке алюминиевых сплавов. — Сварочное производство, 1973, № 11, с. 22—25.
8. Оботуров В. И., Крюковский В. Н., Ерохин А. А. Роль атмосферы помещений и условий производства в образовании дефектов в сварных швах из алюминиевых сплавов. — В кн.: Сварка и резка цветных металлов и сплавов. — М.: МДНТП им. Ф. Э. Дзержинского, 1972, с. 25—27.
9. Оботуров В. И., Толкачев Ю. И. Применение импульсной сварки для повышения качества сварных соединений из алюминиевых сплавов. — В кн.: Сварка и резка цветных металлов и сплавов. — М.: МДНТП им. Ф. Э. Дзержинского, 1972, с. 8—11.
10. Лапин Е. М., Черкасов Н. Е. Эффективность разрушения окисных плен в сварных соединениях из сплавов АМгб при однофазной,

- трехфазной и импульсной сварке. — В кн.: Сварка и резка цветных металлов и сплавов. — М.: МДНТП им. Ф. Э. Дзержинского, 1972, с. 163—168.
11. Плешивцев Н. В. Катодное распыление. — М.: Атомиздат, 1968. — 343 с.
 12. Бродский А. Я. Аргодуговая сварка вольфрамовым электродом. — М.: Машгиз, 1956. — 382 с.
 13. Дятлов В. И., Самотрясов В. А., Фурсов В. А. Электродуговая тонкослойная наплавка. — В сб.: Тезисы докладов к XX итоговой сессии по работам в области сварки, выполненным в 1968. — Л.: 1969, с. 62—63.
 14. Дятлов В. И. Вольт-амперная характеристика сжатой электрической дуги. — Автоматическая сварка, 1961, № 1, с. 17—23.
 15. Фурсов В. А., Самотрясов М. С., Цехмистер И. М. Катодное распыление в сварочной дуге. — Автоматическая сварка, 1970, № 11, с. 4—7.
 16. Гапченко М. Н., Фурсов В. А., Баранов Н. А. и др. Очистка плавящихся поверхностей катодным распылением. — Сварочное производство, 1973, № 11, с. 1—2.
 17. Воробай Н. М., Рабкин Д. М., Фатеев Ю. Ф. и др. Химическое полирование поверхностей алюминия и его сплавов под сварку. — Автоматическая сварка, 1971, № 12, с. 63—64.
 18. Котнева Л. У., Головатенко Р. Т., Кочанова А. И. и др. Применение емкостно-омического метода оценки качества поверхности проволоки Sv-AMr6 после химического фрезерования. — Сварочное производство, 1974, № 4, с. 37—38.
 19. Богоявленский А. Ф. Определение толщины окисла на тантале методом измерения емкости. — Заводская лаборатория, 1968, № 12, с. 1490—1492.
 20. Бакулин А. В., Сышников В. И. Исследование дефектности окисных пленок на титане импедансным методом. — Защита металлов, 1969, № 1, т. 5, с. 124—126.
 21. Воробай Н. М., Рева А. А., Сотченко В. П. и др. Механизированная электромеханическая обработка поверхности сварочной проволоки из алюминиевых сплавов. — Информационное письмо, 1980, № 24 (1215) АН УССР ИЭС им. Е. О. Патона.
 22. Рабкин Д. М., Фурсов В. А. О процессе катодного распыления в сварочной дуге. — Физика и химия обработки материалов, 1973, № 5, с. 22—28.
 23. Руссо В. Я. Сварка алюминиевых сплавов в среде инертных газов. — Л.: Судпромгиз, 1962. — 161 с.
 24. Юсуfoва З. А., Лесков Г. И. К вопросу о механизме разрушения окисных плен при сварке алюминиевых сплавов в среде инертных газов. — Сварочное производство, 1970, № 7, с. 57—58.
 25. Юсуfoва З. А. О механизме разрушения окисных плен в стыке при аргодуговой сварке алюминиевых сплавов. — Сварочное производство, 1979, № 10, с. 25—26.
 26. Юсуfoва З. А., Генкин А. Г. Повышение качества герметизирующих швов при сварке алюминиевых сплавов. — Сварочное производство, 1967, № 1, с. 31—32.
 27. Клячкин Я. Л. Сварка цветных металлов и сплавов. — М.: Машиностроение, 1964. — 335 с.
 28. Оботуров В. И., Покладов Ю. П. Характер движения металла жидкой ванны при сварке алюминиевых сплавов. — Сварочное производство, 1977, № 8, с. 79.

29. Никифоров Г. Д., Болдырев А. М., Букуров В. И. Влияние технологических факторов на плотность соединений при сварке сплава АМгб, — В кн.: Надежность сварных соединений и конструкций. — М.: Машиностроение, 1967, с. 125—134.
30. Рабкин Д. М., Игнатьев В. Г., Довбищенко И. В. Дуговая сварка алюминия и его сплавов. — М.: Машиностроение, 1982. — 95 с.
31. Патош Б. Е., Гвоздецкий В. С., Дудко Д. А. и др. Микроплазменная сварка. — Киев: Наукова думка, 1979. — 248 с.
32. Рабкин Д. М., Иванова О. Н., Стебловский Б. А. и др. Сварка алюминиевых сплавов на постоянном токе прямой полярности. — Автоматическая сварка, 1971, № 3, с. 71—72.
33. Теоретические основы сварки./Под ред. В. В. Фролова. — М.: Высшая школа, 1970. — 592 с.
34. Иванова О. Н., Лозовская А. В., Рабкин Д. М. и др. Свойства соединений алюминиевых сплавов, выполненных на постоянном токе прямой полярности. — Автоматическая сварка, 1973, № 3, с. 8—10.
35. Зубриенко Г. Л., Галкин Н. П., Гапонов Д. А. и др. Аргодуговая сварка алюминиевых сплавов с прерывистой подачей присадочной проволоки. — Сварочное производство, 1972, № 4, с. 46—47.
36. Ситянин Ю. М., [Терминасов Ю. С., Зубриенко Г. Л. Структура и свойства сварных швов алюминиевых сплавов в зависимости от некоторых факторов технологии сварки. — Сварочное производство, 1979, № 8, с. 28—29.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
1. ЛЕТАТЕЛЬНЫЙ АППАРАТ КАК ОБЪЕКТ СВАРОЧНОГО ПРОИЗВОДСТВА	5
1.1. Классификация летательных аппаратов	5
1.2. Внешние нагрузки, действующие на летательный аппарат	6
1.3. Конструктивно-технологические особенности сварных узлов летательных аппаратов	8
1.4. Классификация сварных швов	9
2. ОСОБЕННОСТИ ПОДГОТОВКИ АЛЮМИНИЯ И ЕГО СПЛАВОВ К СВАРКЕ	15
2.1. Химсостав и физико-механические свойства свариваемых алюминиевых сплавов	15
2.2. Окисные включения при сварке алюминиевых сплавов	18
2.3. Влияние подготовки поверхности и условий аргонодуговой сварки на образование и разрушение окисной пленки	19
2.4. Подготовка поверхности основного металла алюминиевых сплавов перед сваркой	21
2.5. Подготовка поверхности проволоки под сварку	23
3. УЛУЧШЕНИЕ СТРУКТУРЫ МЕТАЛЛА ШВА И ПОВЫШЕНИЕ ГЕРМЕТИЧНОСТИ СОЕДИНЕНИЙ	27
3.1. Механизм разрушения окисных плен непосредственно в процессе дуговой сварки в среде защитных газов	27
3.2. Сварка вольфрамовым электродом переменным асимметричным током	33
3.3. Сварка трехфазной дугой вольфрамовым электродом	34
3.4. Плазменная сварка (сжатой дугой) постоянным током обратной полярности	35
3.5. Особенности гелиево-дуговой сварки вольфрамовым электродом на постоянном токе прямой полярности	38
3.6. Сварка плавящимся электродом	44
3.7. Влияние погонной энергии на качество соединений при аргонодуговой сварке неплавящимся электродом	47
3.8. Сварка с прерывистой подачей присадочной проволоки	50
Литература	51

Св. план 1985, поз. 910

Леонид Арсеньевич Дударь

**ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ ПЛАВЛЕНИЕМ
АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ,
ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В ПРОИЗВОДСТВЕ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ**

Редактор Л. М. Балыкова
Техн. редактор Н. М. Каленюк
Корректор В. П. Петрова

Сдано в набор 9.04.85 г. ЕО 00420.
Подписано в печать 18.07.85 г.
Формат 60×84 1/16. Бумага оберточная.
Гарнитура литературная. Высокая печать.
Усл.п.л. 3,3. Уч.-изд.л. 3. Тираж 500 экз.
Заказ 328. Цена 15 к.

Куйбышевский ордена Трудового Красного Знамени
авиационный институт имени академика С. П. Королева,
г. Куйбышев, ул. Молодогвардейская, 151.

Тип. УЭЗ КуАИ, г. Куйбышев, ул. Ульяновская, 18.