

Государственный комитет Российской Федерации  
по высшему образованию

Самарский государственный аэрокосмический университет  
имени академика С. П. Королева

Л. А. Дуляр    Л. А. Наумов

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ  
АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ, ИСПОЛЗУЕМЫХ  
В ПРОИЗВОДСТВЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Учебное пособие

Самара 1995

[1995]

УДК 621.791.65

Особенности электронно-лучевой сварки алюминиевых сплавов, используемых в производстве летательных аппаратов: Учеб. пособие /Л.А.Д у д а р ь, Л.А. Н а у м о в; Самар. аэрокосм. ун-т. Самара, 1995. 76 с.

ISBN 5-230-16964-8

Излагается наиболее прогрессивный технологический процесс электронно-лучевой сварки алюминиевых сплавов, направленный на повышение механических свойств и герметичности соединений. Дан научный анализ возможности получения качественных сварных соединений из термически упрочняемых и нагартованных алюминиевых сплавов.

Пособие предназначено для студентов старших курсов дневной и вечерней форм обучения по специальностям 1301, 1302, 1306 и слушателей курсов повышения квалификации ИТР. Подготовлено на кафедре ЦДА.

Табл. 24. Ил. 27. Библ.огр.: 44 назв.

Печатается по решению редакционно-издательского совета Самарского государственного аэрокосмического университета имени академика С.П.Королева

Рецензенты: С.И.С п е к т ь р, Л.И.С о л ь н

ISBN 5-230-16964-8

С

Самарский государственный аэрокосмический университет, 1995

## О Г Л А В Л Е Н И Е

Предисловие .....	—
1. Физическая сущность электронно-лучевой сварки ....	6
1.1. Энергия электронов и ее свойства .....	7
1.2. Принцип сварки электронным лучом в вакууме...	9
1.3. Условия устойчивого существования глубокого конуса при неподвижном луче .....	17
1.4. Условия движения жидкого металла в кратере из зоны плавления в зону кристаллизации при сварке .....	21
2. Технология электронно-лучевой сварки .....	22
2.1. Геометрия поперечных сечений шва .....	26
2.2. Особенности электронно-лучевой сварки в различных пространственных положениях .....	30
3. Сварка алюминия и его сплавов .....	33
3.1. Свойства свариваемых алюминиевых сплавов ....	33
3.2. Подготовка заготовок и свариваемых кромок ...	39
3.3. Элементы технологии и режимы сварки .....	43
3.4. Сварка с присадочной проволокой .....	49
3.5. Деформация сварных конструкций из алюминиевых сплавов .....	50
3.6. Механические свойства сварных соединений ....	54
3.7. Основные дефекты сварных соединений .....	58
3.8. Особенности сварки наиболее нагруженных стыковых швов крупногабаритных цилиндрических обечайек из термически упрочняемого сплава I201 .....	62
3.9. Возможности изготовления обечайек большого диаметра из сплава I201 с равнопрочностью сварных швов .....	66
3.10. Взаимосвязь параметров процесса сварки и геометрии шва .....	70
Библиографический список .....	72

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Повышение качества продукции и снижение материальных и трудовых затрат на ее изготовление являются постоянно действующими факторами 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 шва, 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 журнальные публикации, освещающие отдельные вопросы особенностей этой сварки.

Цель настоящей работы — дать краткое систематизированное изложение комплекса вопросов, с которыми встречаются студенты и инженеры-механики при проектировании 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.

Определяются механизм и природа возникновения дефектов в металле шва, вызванные 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 соединения.

Рассматриваются способы управления формированием структуры литого металла. Освещаются также вопросы подготовки поверхности основного материала и присадочной проволоки перед сваркой.

Особое внимание уделено электронно-лучевой сварке термически упрочняемых и нагартованных алюминиевых сплавов. Как известно, коэффициент прочности таких материалов после аргоно-дуговой сварки составляет 0,5...0,65 временного сопротивления разрыву основного материала. Это вызывает существенное возрастание массы сварных конструкций. Соединения же, выполненные ЭЛС, имеют временное сопротивление разрыву на 15...25% выше, а ширину ЗТВ в 2 - 3 раза меньше, чем в дуговых способах. Это позволяет значительно уменьшить массовые характеристики сварных конструкций.

## 1. ФИЗИЧЕСКАЯ СУЩНОСТЬ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ

Являясь разновидностью наиболее распространенного в технике способа сварки плавлением, ЭЛС вместе с тем качественно отличается от всех ранее известных методов сварки. При ЭЛС происходят сложные гидро- и газодинамические, плазменные, излучательные, деформационные процессы. Некоторые из них протекают интенсивно и оказывают существенное, а иногда и определяющее влияние на формирование шва. Поэтому для разработки эффективных, технологических и аппаратурных приемов повышения качества формирования шва необходимо изучение указанных физических процессов.

Этот эффективный способ основан на использовании кинетической энергии электронов, движущихся с большой скоростью в вакууме.

При ЭЛС для нагрева и расплавления основного металла используется энергия, получаемая в результате бомбардировки его ускоренными электронами, сфокусированными в узкий пучок. При попадании на поверхность свариваемых деталей электроны тормозятся, их кинетическая энергия превращается в тепловую и образуется сварочная ванна.

По мере перемещения изделия или источника сварочного нагрева происходит затвердевание расплавленного металла и образование шва. Металл шва так же, как и при других видах сварки плавлением, имеет ленточную структуру.

Важнейшая особенность используемого в качестве источника нагрева пучка электронов — это то, что он сосредоточен на весьма малом пятне, диаметр которого может составлять десятые и даже сотые доли миллиметра. Узкий пучок и малая протяженность ЭЛС обуславливают небольшие деформации свариваемых изделий.

## I.I. Энергия электронов и ее свойства

Свободные электроны под действием электрических или магнитных полей могут перемещаться. Поскольку электроны обладают самой малой инертной массой из всех элементарных частиц, имеющих заряд, то электрону можно сообщить большие ускорения. Если электрон поместить в однородное поле напряженностью  $E$ , созданное между двумя параллельными пластинами достаточно большой протяженности, то на электрон будет действовать сила, равная произведению величины заряда на напряженность поля в месте нахождения заряда:

$$F = -eE.$$

Знак минус показывает, что вследствие отрицательного заряда электрона сила имеет направление, противоположное направлению вектора напряженности электрического поля. Работа, затраченная электрическим полем на перемещение заряда из одной точки в другую, равна произведению величины заряда на разность потенциалов между этими двумя точками:

$$A = eU = e(U_2 - U_1),$$

где  $U$  — разность потенциала между точками 1 и 2. Эта работа затрачивается на сообщение электрону кинетической энергии

$$W_k = \frac{m_0(v^2 - v_0^2)}{2},$$

где  $v$  и  $v_0$  — скорости движения электрона в точках 1 и 2.

Сумма кинетической и потенциальной энергий электронов при их движении в электрических полях остается постоянной, поэтому

$$\frac{m_0(v^2 - v_0^2)}{2} = eU,$$

если начальная скорость электрона  $v_0 = 0$ , то

$$\frac{m_0 v^2}{2} = eU.$$

Отсюда следует, что энергия электронов определяется массой и скоростью частицы. Энергия электрона может достигать больших значений и зависит

от разности потенциалов разгоняющего поля. Скорость электрона, выраженная через потенциал разгоняющего поля  $U$ , равна

$$v = \sqrt{\frac{2e}{m_e} U}$$

Подставляя в это выражение значение заряда и массы электрона, можно получить приближенное соотношение для расчета скорости электрона (в км/с):

$$v = 600\sqrt{U}$$

Скорость, приобретенная электроном при движении в ускоряющем поле, зависит только от разности потенциалов. Из последнего соотношения видно, что скорости электронов даже при сравнительно небольшой разности потенциалов достигают значительных величин. Например, при  $U = 10000$  В скорость электронов  $v = 60000$  км/с.

Установлено, что электроны, обладающие определенной энергией, могут проникать в вещество. Толщина слоя вещества, пройденный который электрон теряет скорость, определяет его пробег. Пробеги электронов в металлах при сравнительно небольших энергиях электронов (10–82 кэВ) были изучены Б.Шенландом. Согласно Шенланду пробег (в см) электронов выражается зависимостью

$$\delta = 2,6 \cdot 10^{-12} \frac{U^2}{\rho}$$

где  $U$  – разгоняющее напряжение, В;  $\rho$  – плотность вещества, г/см<sup>3</sup>.

Расчеты показывают, что электроны в зависимости от разгоняющего напряжения и свойств металла могут проникать на глубину нескольких десятков и даже сотен микрометров. Глубина проникновения электронов в металл невелика, но учет ее позволяет объяснить некоторые эффекты, связанные с особенностями электронного нагрева при сварке.

Изучение адсорбции монохроматического потока электронов показывает, что проникающий в вещество электрон испытывает многократное рассеяние и теряет энергию не сразу и в результате многочисленных соударений с ядрами атомов и электронами решетки. В результате этих столкновений меняется скорость и направление движения электронов, проникающих в вещество. Электроны растрачивают основную долю энергии в конце пробега (рис. 1) [1]. Таким образом, в отличие от других широко применяемых методов сварки, при которых нагрев происходит по-



средством теплопередачи через поверхность металла, электронный нагрев осуществляется в самом веществе. При этом электроны теряют свою энергию неравномерно в направлении пролета. Вследствие этого на более интенсивное тепловыделение наблюдается на некоторой глубине.

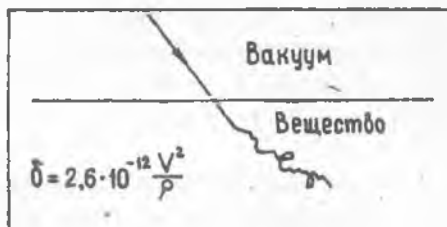


Рис. 1. Путь электрона в веществе

## 1.2. Принцип сварки электронным лучом в вакууме

Получение свободных электронов достигается применением раскаленного металлического катода, эмитирующего электроны. Ускорение электронов обеспечивается электрическим полем с высокой разностью потенциалов между катодом и анодом. Фокусировка — концентрация электронов достигается использованием магнитных полей. Резкое торможение электронного потока происходит автоматически при внедрении электронов в металл.

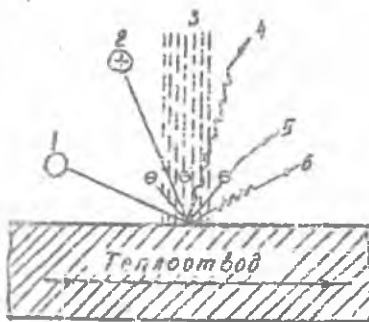
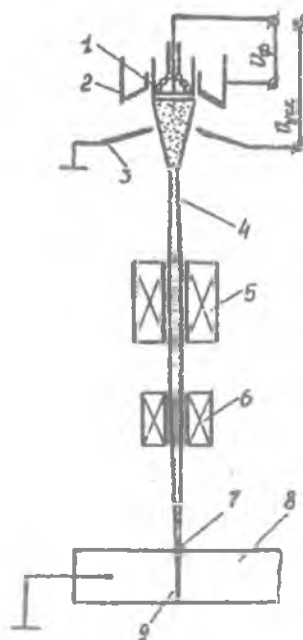


Рис. 2. Физическая картина явлений, сопровождающих проникновение электронов в вещество: 1 — молекулы газа; 2 — ионы; 3 — луч; 4 — рентгеновское излучение; 5 — отраженные и вторичные электроны; 6 — тепловое излучение

Физическая картина внешних явлений, сопровождающих действие электронов на металл, следующая: рентгеновское излучение, тепловыделение, возникновение вторичных электронов, испарение металла в виде атомов и ионов металла (рис. 2) [1].

Вторичные электроны делятся на три группы: а) упругоотраженные, энергия которых примерно равна падающим; б) отраженные в результате неупругого соударения и имеющие более или менее большие потери; в) собственно вторичные электроны, энергия которых не превышает 50 эВ. Энергия отраженных электронов в среднем составляет 70% энергии первичных. Если отношение количества рассеянных электронов

к количеству падающих обозначить  $\beta$ , то потери энергии пучка на рассеянных электронах составляет  $E_p = 0,7\beta$ . Величина  $\beta$  колеблется в пределах  $0,1 \dots 0,45$  в зависимости от порядкового номера элемента.



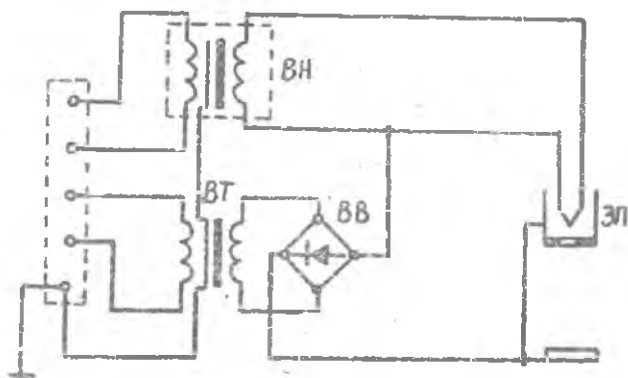
Р и с. 3. Схема электронно-лучевой сварочной пушки с электронно-статической и электромагнитной фокусировкой луча: 1 - катод; 2 - прикатодный электрод; 3 - анод (ускоряющий электрод); 4 - электронный луч; 5 - фокусирующая магнитная линза; 6 - магнитная отклоняющая система; 7 - фокусное пятно; 8 - свариваемое изделие; 9 - сварной шов.

Электронный луч, используемый для сварки, создается в специальном приборе - электронной пушке. Сварочные электронные пушки - достаточно сложные и совершенные электронные приборы, позволяющие создавать узкие электронные пучки с большой плотностью энергии (рис. 3) [2]. Катод пушки, нагреваясь до высоких температур, эммитирует электроны. Между катодом и анодом создается мощное электрическое поле: положительный потенциал анода достигает нескольких десятков тысяч вольт. Поэтому электроны на пути к аноду приобретают значительную энергию и разгоняются до чрезвычайно больших скоростей. Они подвергаются сжатию в пучок с помощью прикатодного электрода (так называемая электростатическая фокусировка). Катод, прикатодный электрод и анод (ускоряющий электрод) образуют прожектор, который должен обеспечить первичное фокусирование сходящегося пучка электронов. Однако такой пучок электронов еще нельзя использовать для сварки: его необходимо дополнительно сжать (сфокусировать), чтобы добиться максимальной плотности энергии в сечении пучка - пятна при встрече его с поверхностью свариваемого изделия. Для этой цели на пути луча помещают специальное устройство - фокусирующие элект-

ромагнитные линзы. В современных сварочных пушках используют именно такую комбинированную электростатическую и электромагнитную фокусировку.

С помощью магнитной отклоняющей системы корректируют положение луча относительно кромок свариваемых деталей. Эта система может выполнять и другие функции: расщеплять пучок электронов на два и более пучков для одновременной сварки нескольких швов. Величина ускоряющего напряжения современных пушек находится в пределах 30...200 кВ.

Для питания сварочных пушек применяются специальные стабилизированные источники мощностью 5...100 кВт и более. Электрическая схема энергетического комплекса (рис. 4) [3] состоит из высоковольтных трансформаторов ВТ и выпрямителя ВВ, высокопотенциального накального трансформатора ВН и электронной пушки.

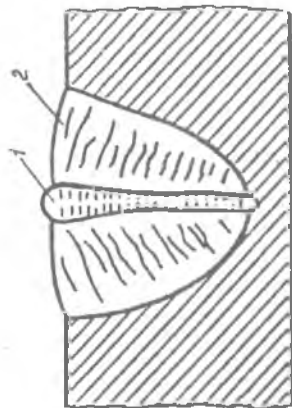


Р и с. 4. Электрическая схема источника питания

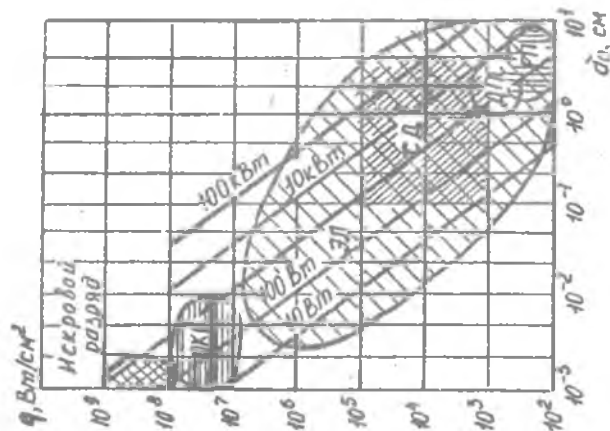
Для обеспечения свободного движения электронов от катода к аноду и далее к пучковой, для тепловой и эпоксидной изоляции катода, а также для предотвращения возможности возникновения дугового разряда между электродами в установке создается глубокий вакуум порядка  $10^{-4}$  мм рт.ст. ( $133 \cdot 10^{-4}$  Н/м<sup>2</sup>), обеспечиваемый насосной системой установки.

Движение электронов в вакууме не сопровождается световыми эффектами и поэтому луч не виден, но его действие на вещество можно наблюдать по нагреву места бомбардировки, свечению люминофоров и т.п.

Плотность энергии в источнике нагрева определяет его эффективный коэффициент использования теплоты, форму провара (рис. 5), стерженьки и электронно-лучевой и аргоно-дуговой сварке.



Р и с. 5. форма провара, отнесенная к электронно-лучевой (1) и аргонодуговой сварке (2)



Р и с. 6. Плотность энергии и диаметр пятна нагрева для различных источников теплоты: П - газовое пламя; ДИС - дуговая плазма; СД - сварочная дуга; ЭЛ - электронный луч; ОКГ - оптический квантовый генератор

На рис. 6 [1] приведены плотность энергии и диаметр пятна нагрева для различных источников теплоты, а в табл. I - плотность энергии различных источников теплоты и минимальная площадь пятна нагрева.

Т а б л и ц а I

Плотность энергии различных источников теплоты  
и минимальная площадь пятна нагрева

Источник теплоты	Минимальная площадь пятна нагрева, см <sup>2</sup>	Максимальная плотность энергии, Вт/см <sup>2</sup>
Ацетилено-кислородное пламя	$10^{-2}$	$5 \cdot 10^4$
Сварочная дуга	$10^{-3}$	$1 \cdot 10^5$
Электронный луч	$10^{-7}$	$5 \cdot 10^8$
Луч оптического квантового генератора	$10^{-7}$	$5 \cdot 10^8$

Характерная особенность сварки электронным лучом - возможность получения сварных соединений при минимальных затратах теплоты на расплавление металла.

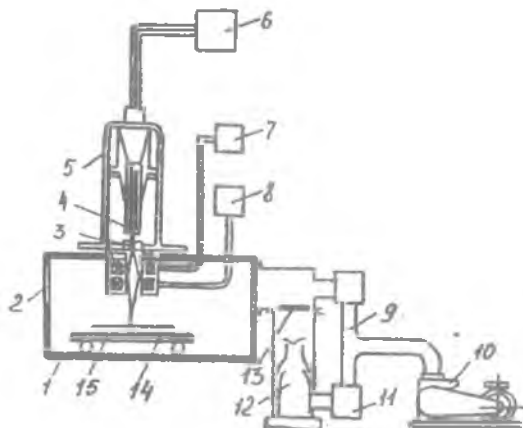
Из табл. 2 следует, что при электронно-лучевой сварке требуется в 10...15 раз меньше энергии, чем при дуговой. На рис. 5 показано соотношение площадей зон проплавления, полученных при дуговой и электронно-лучевой сварке. Площадь зоны проплавления при электронно-лучевой сварке в 25 раз меньше, чем при дуговой.

Т а б л и ц а 2

Затраты энергии при сварке металлов толщиной 12,5 мм,  
кДж/см

Сварка	Сталь	Сплав алюминия
Дуговая сварка в аргоне:		
плавящимся электродом	76	-
вольфрамовым электродом	-	46
электронно-лучевая	7,3	3,2

Благодаря тому, что вакуум является надежной защитной средой, а электронный луч – универсальным тепловым источником, ЭЛС оказалась особенно эффективной для соединения деталей и узлов, для целого ряда химически активных и тугоплавких металлов и сплавов обеспечивает более высокие показатели свойств сварного шва, чем сварка в инертных газах (Ar и He). Поэтому целый ряд сварных конструкций из этих материалов (вольфрам, молибден, тантал, цирконий, титан и др.) изготавливают исключительно при помощи электронно-лучевой сварки.



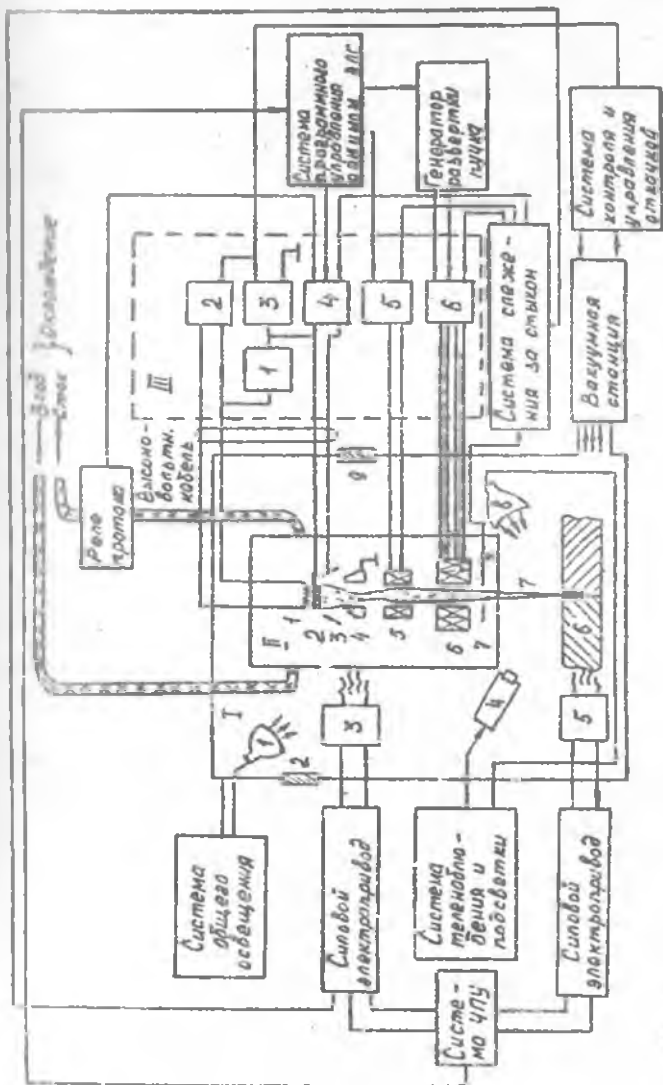
Р и с. 7. Схема электронно-лучевой сварочной установки: 1 – вакуумная камера; 2 – смотровое окно; 3 – анод; 4 – катод; 5 – сварочная пушка; 6 – высоковольтный источник питания; 7 – система фокусировки луча; 8 – система электромагнитного отклонения пучка электронов; 9 – вакуумпровод; 10 – форвакуумный насос; 11 – вентиль; 12 – высоковакуумный насос; 13 – затвор высоковакуумного агрегата; 14 – свариваемое изделие; 15 – механизм перемещения

размерами свариваемых изделий. В настоящее время разработаны и эксплуатируются в производственных условиях сварочные камеры объемом в десятки и сотни кубических метров. Внутри камеры располагается устройство для перемещений свариваемого изделия или пушки.

Современная схема установки для ЭЛС с числовым программным управлением приведена на рис. 8 [4], она включает в себя вакуумную камеру 1 с вмонтированными иллюминаторами 2 и 9, ламповыми осветителями 1 и 8, манипулятором пушки 3, телекамеру, манипулятор изделия 5, свариваемое изделие 6 электронным лучом 7, создаваемым электронной

более высокие показатели свойств сварного шва, чем сварка в инертных газах (Ar и He). Поэтому целый ряд сварных конструкций из этих материалов (вольфрам, молибден, тантал, цирконий, титан и др.) изготавливают исключительно при помощи электронно-лучевой сварки.

Электронно-лучевая сварочная установка (рис. 7) включает следующие основные узлы и устройства: герметичную камеру, вакуумную систему с форвакуумным и высоковакуумным насосами, сварочную пушку с системами электропитания, фокусировки, управления лучом, вспомогательные цепи и контрольно-измерительную аппаратуру. Габариты вакуумных камер определяются



Р и с. 8. Функциональная схема установки для ЭЛС: I - вакуумная камера; 1, 8 - лампы осветители; 2, 9 - вмонтированные катоды; 3 - манипулятор пучка; 4 - телекамера; 5 - манипулятор изделия; 6 - свариваемое изделие; 7 - электронный пучок; II - электронная пушка: 1 - подогреватель; 2 - катод; 3 - приток-отводный электрод; 4 - анод; 5 - фокусирующая линза; 6 - отклоняющие катушки; 7 - ДВЭ - датчик вторичных электронов; III - источник питания пучка: 1 - система бомбардировки катода; 2 - система управления подогревом катода; 3 - источник ускоряющего напряжения; 4 - система управления током пучка; 5 - система электромагнитной фокусировки пучка; 6 - усилитель отклонения пучка

пушкой; П – электронная пушка, в свою очередь состоит из самостоятельного корпуса, подогревателя 1, катода 2, прикатодного электрода 3, щелевого анода 4, фокусирующей линзы 5, отклоняющих катушек 6 и ДВЭ – датчика вторичных электронов; Ш – источник питания включает в себя: 1 – систему бомбардировки катода; 2 – систему управления подогревом катода; 3 – источник ускоряющего напряжения; 4 – систему управления током пучка; 5 – систему электромагнитной фокусировки пучка; 6 – усилитель отклонения пучка.

Все остальные системы, обслуживающие перечисленные узлы I, П, Ш, выносятся за их пределы на функциональной схеме установки и имеют самостоятельные наименования.

ЭДС выполняется, как правило, в высоковакуумных камерах при давлении остаточных газов порядка  $133 \cdot 10^{-4}$  Н/м<sup>2</sup> ...  $133 \cdot 10^{-3}$  Н/м<sup>2</sup>. Из данных табл. 3 [4] видно, что по отношению к примесям-газам (кислороду и азоту) такая среда намного чище лучших сортов аргона. Так, уже при давлении  $133 \cdot 10^{-2}$  Н/м<sup>2</sup> содержание вредных примесей-газов в вакуумной камере значительно меньше, чем в чистом аргоне марки А, содержащем 0,003 об.% O<sub>2</sub> и 0,01 об.% N<sub>2</sub>.

При сварке в вакууме исключается загрязнение шва газами и обеспечивается максимальная пластичность и вязкость сварных соединений.

Таким образом, исходя из конструктивных особенностей установок, нижней допустимой границей давления (вакуума) для электронно-лучевых установок следует считать  $1 \cdot 10^{-2}$  Па. В реальных условиях давление стараются довести до  $10^{-3}$ ... $10^{-4}$  Па, так как при ухудшении вакуума в электронной пушке резко увеличивается число ионизированных электронами ионов остаточных газов, и это может привести к пробое промежутка между анодом и катодом пушки.

Т а б л и ц а 3  
Содержание газов в единице объема при различных степенях вакуума

Давление, мм рт.ст. (Н/м <sup>2</sup> )	Содержание газов в ед. объема, %	O <sub>2</sub> , об.%	N <sub>2</sub> , об.%
760 (1·10 <sup>0</sup> )	100	20,1	79,0
1 (133·10 <sup>-2</sup> )	0,13	0,03	0,1
10 <sup>-1</sup> (133·10 <sup>-1</sup> )	0,013	0,003	0,01
10 <sup>-2</sup> (133·10 <sup>-2</sup> )	0,0013	0,0003	0,001
10 <sup>-3</sup> (133·10 <sup>-3</sup> )	0,00013	0,00003	0,0001
10 <sup>-4</sup> (133·10 <sup>-4</sup> )	0,000013	0,000001	0,00001

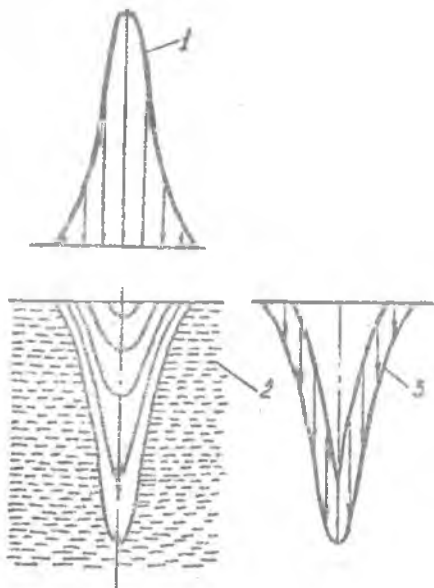


### 1.3. Условия устойчивого существования глубокого конуса при неподвижном луче

При неподвижном электронном луче (рис. 9) [1] в начальной стадии наблюдается образование углубления в металле в виде конуса. Конус образуется следующим образом: после достижения заданной мощности и фокусирования электронного луча вся мощность луча сосредотачивается в верхнем слое свариваемого металла, толщина которого равна глубине проникновения электронов. При этом площадь пятна нагрева равна площади сечения луча. Вследствие того, что плотность энергии на поверхности металла максимальна, наблюдается интенсивный вынос металла из зоны нагрева. В металле образуется углубление в виде конуса, боковая поверхность которого значительно больше площади основания конуса.

Во время образования конечного углубления плотность энергии луча на его боковой поверхности уменьшается. Установившаяся плотность энергии на боковой поверхности конуса проплавления имеет такую величину, при которой размеры кратера уже не изменяются.

Процесс перемещения луча по кадетлю сопровождается дополнительными явлениями, также обусловленными интенсивным действием электронного луча. При движущемся электронном луче плавление металла происходит на передней стенке кратера, после чего расплавленный металл перемещается к задней стенке, не подвергаясь нагреву электронным лучом.



Р и с. 9. Образование зоны проплавления при неподвижном луче: 1 - распределение энергии в луче; 2 - форма проплавления; 3 - распределение энергии луча в зоне расплавления

Устойчивое существование глубокого конуса при неподвижном луче обуславливают следующие силы, действующие на жидкий металл, находящийся в кратере [1]:

1. Сила давления потока электронов на единицу поверхности жидкого металла

$$P_1 = \frac{l}{e} m v,$$

где  $l$  - плотность тока луча, А/см<sup>2</sup>;  $e$  - заряд электрона,  $1,6 \cdot 10^{-19}$  Кл;  $m$  - масса электрона,  $9,1 \cdot 10^{-28}$ ;  $v$  - скорость электронов, см/с. Скорость электрона, выраженная через разность потенциалов ускоряющего напряжения  $U$ ,

$$v = \sqrt{2 \frac{e}{m} U}.$$

Учитывая это, можно записать:

$$P_1 = i \sqrt{2 \frac{m}{e} U} \cdot 10^7.$$

Сила давления электронного потока

$$F_1 = 0,34 J \sqrt{U},$$

где  $J$  - сила тока луча, А.

При  $J = 0,03$  А,  $U = 50$  кВ,  $F_1 = 0,34 \cdot 0,03 \sqrt{50 \cdot 100} = 2,3$  мкс.

Таким образом, сила давления электронного потока на всю поверхность кратера измеряется несколькими миллиграммами, а давление электронного потока весьма мало.

2. Электромагнитная сила, возникающая от тока луча. Электронный луч можно рассматривать как упругий газообразный проводник. Собственное магнитное поле окружает луч и воздействует на него со всех сторон. При сварке в луче и расплавленном металле ванны протекает один и тот же ток. Поэтому собственное магнитное поле также воздействует и на сварочную ванну. При движении луча по поверхности расплавленной ванны мостик жидкого металла, находящийся под лучом, также стремится переместиться под действием электромагнитной силы  $F_2$ :

$$F_2 = 2,3 \cdot 10^{-2} J^2 l g \frac{R_0}{r_0},$$

где  $J$  - сила тока луча, А;  $R_0$  - радиус кратера расплавленного металла, см;  $R_0 = l/2e$  ( $e$  - ширина свариваемого шва, см);  $r_0$  - радиус пучка луча, см; при  $R_0 = 0,25$  см,  $r_0 = 0,05$  см;  $J = 30$  мА.

$$F_2 = 2,3 \cdot 10^{-2} \left( \frac{30}{100} \right)^2 \lg \frac{0,25}{0,05} = 1,5 \cdot 10^{-5} \text{ нтс.}$$

Величина электромагнитной силы исчезающе мала, и ее во многих случаях электронно-лучевой сварки можно не принимать во внимание.

3. Реакция паров металла. При воздействии потока электронов на металл его поверхность нагревается до очень высоких температур, вследствие чего с поверхности расплавленного металла наблюдается испарение. При испарении металла создается определенное реактивное давление на жидкий металл.

Сила реакции паров может быть получена из следующего выражения:

$$F_3 = mV,$$

где  $m$  - количество пара, г/с;  $V$  - скорость молекул испаряющегося металла, см/с.

Скорость испаряющегося вещества с поверхности в вакууме можно определить, используя уравнение Денгемора

$$G = P \sqrt{\frac{M}{2\pi RT}}$$

где  $G = \frac{m}{A}$  - скорость испарения, г/см<sup>2</sup>·с;  $A$  - площадь испарения, см<sup>2</sup>;  $m$  - масса испаряющегося металла, г/с;  $P$  - давление пара при температуре  $T$ , мм рт.ст.;  $M$  - атомная масса металла;  $R$  - универсальная газовая постоянная.

Для железа  $G = 0,436 P/T^{1/2}$  г/см<sup>2</sup>·с. Температура поверхности жидкого металла в кратере может быть примерно равной 2300 К, а давление пара  $P$  при этой температуре 4,1 мм рт.ст. (547 Н/м<sup>2</sup>).

Скорость вылета паров из кратера  $V$  (в см/с) определяется из выражения

$$V = \frac{4\pi}{\pi d^2} \cdot \frac{22,4 \cdot 10^3}{M} \cdot \frac{T}{273} \cdot \frac{760}{P},$$

где  $d$  - диаметр кратера, через который пары вылетают в вакуум, см;  $M$  - атомная масса металла;  $T$  - температура пара, К.

При  $m = 4,6 \cdot 10^{-3}$  г/с,  $d = 0,2$  см,  $M = 56$  (для железа),  $T = 2300$  К,  $P = 4,1$  мм рт.ст.  $V = 9,5 \cdot 10^4$  см/с.

Поэтому реакция испаряющегося пара:

$$F_3 = mV = 4,6 \cdot 10^{-3} \cdot 9,5 \cdot 10^4 = 450 \text{ мкс.}$$

Таким образом, сила  $F_3$  представляет собой значительную величину.

4. Статическое давление пара в кратере, вызванное испарением расплавленного металла. Это давление можно считать максимальным равным давлением насыщения при температуре жидкого металла в кратере. Следовательно, если давление в кратере достигает значения давления насыщения, сила, действующая на поверхность кратера, определяется из выражения

$$F_4 = \frac{P}{760} \cdot 10^6 \cdot \frac{\pi}{4} D_c^2,$$

где  $P$  — давление насыщенного пара, мм рт.ст.;  $D_c$  — средний диаметр кратера, см.

5. Сила поверхностного натяжения, действующая на жидкий металл

$$F_5 = \pi D \sigma.$$

При  $D = 0,2$  см и  $\sigma = 1000$  мкс/см  $F_5 = 630$  мкс.

6. Сила тяжести, действующая на расплавленный металл,

$$F_6 = m_0 g,$$

где  $m_0$  — масса расплавленного металла, г;  $g$  — ускорение свободного падения, см/с<sup>2</sup>.

При  $g = 550$  кал/с,  $U = 1,3$  см/с толщина жидкого слоя  $h$  в кратере равна  $1,7 \cdot 10^{-2}$  см. Масса жидкого металла

$$m_0 = \frac{1}{3} \pi H^2 (\gamma_0^2 - \gamma^2) \rho,$$

где  $H$  — глубина проплавления, см;  $\gamma$  — радиус кратера, см;  $\gamma_0 = \gamma + h$ , см;  $\rho$  — плотность металла, г/см<sup>3</sup>.

При  $H = 0,5$  см,  $\gamma = 0,15$  см,  $\gamma_0 = 0,15 + 0,017$  см  $m_0 = 0,022$  г или  $F_6 = 22$  мкс.

7. Металлостатическое давление, действующее на расплавленный металл,  $P_s = \rho \cdot g$ .

Сила, действующая на дне кратера в результате металлостатического давления,

$$F_7 = \rho g \frac{\pi}{4} D^2.$$

При  $\rho = 6,9 \text{ г/см}^3$ ,  $g = 980 \text{ см/с}^2$ ,  $H = 1,0 \text{ см}$  и  $D = 0,1 \text{ см}$   
 $F_7 = 6,9 \cdot 980 \cdot 1,0 \frac{\pi}{4} (0,1)^2 = 550 \text{ мкг.}$

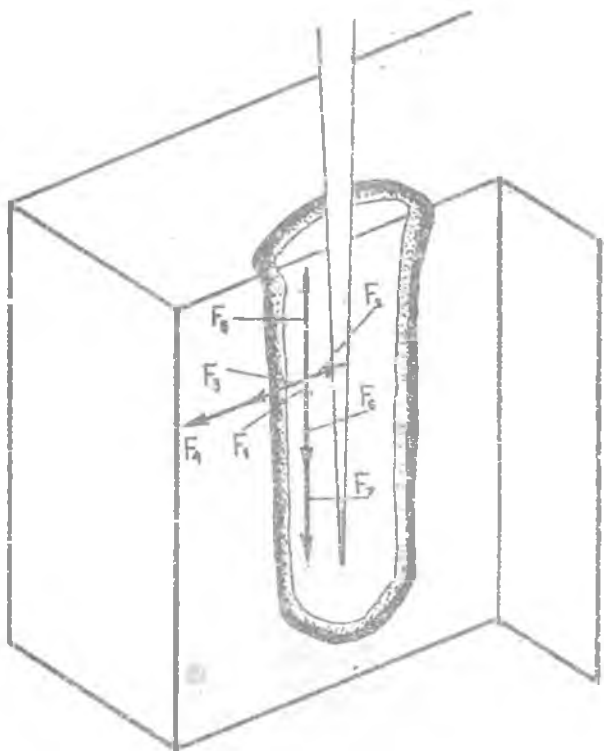
#### 1.4. Условия движения жидкого металла в кратере из зоны плавления в зону кристаллизации при сварке

Анализ участия сил, действующих в кратере при неподвижном луче, в переносе металла и процессе сварки показывает, что эти силы не могут вызвать значительного перемещения металла (рис. 10). Таким образом, возникает необходимость найти силы, которые могли бы вызвать движение жидкого металла в кратере из зоны плавления в зону кристаллизации. Основное отличие теплового состояния кратера движущегося электронного луча — несимметричное его расположение в кратере относительно его центра.

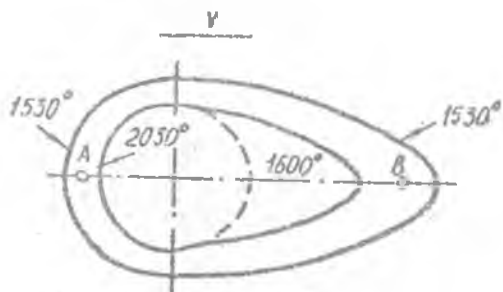
Вследствие этого при относительном перемещении изделия и электронного луча возникает значительный градиент температур в кратере. На передней стенке кратера, которая подвергается воздействию электронного луча, температура в поверхностном слое может достигать температуры кипения, на задней же стенке кратера температура близка к температуре кристаллизации.

Очевидно, причину переноса металла необходимо искать в нарушении термодинамического равновесия, вызванного несимметричным расположением источника тепла в кратере (рис. 11) [1].

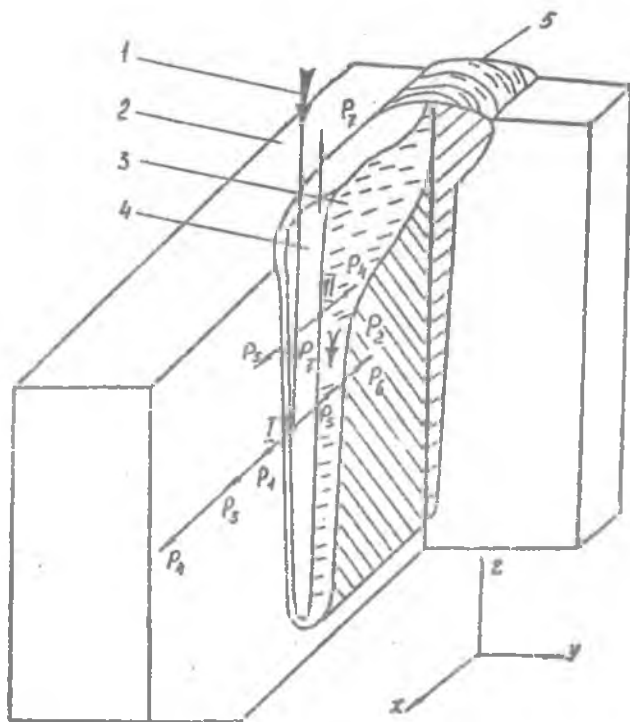
Как известно, качество сформированной шва при электронно-лучевой сварке во многом определяется формой поперечного сечения зоны проплавления и движением жидкого металла в сварочной ванне. В свою очередь, форма поперечного сечения шва целиком определяется параметрами парагазового канала, существующего в расплаве, если плотность вводимой мощности превышает  $10^5 \text{ Вт/см}^2$ . Параметры канала и движение расплава в ванне определяется суммарным механическим давлением, действующим на поверхность жидкого металла. Жидкий металл в ванне пребывает в состоянии непрерывного перемешивания. Это приводит к пульсации размеров парагазового канала и интенсивному теплообмену внутри жидкости.



Р и с. 10. Силы, действующие на элемент жидкого металла в кратере при неподвижном луче



Р и с. 11. Схема распределения температуры в кратере



Р и с. 2. Силы, действующие на жидкий металл в кратере при сварке

Основы анализа динамических явлений в сварочной ванне – выделение и оценка распределения механических сил, действующих на жидкий металл, приведен в работах [5, 15].

Анализ возможных сил, действующих на металл в сварочной ванне, отражает особенности движения жидкого металла (рис. 12) [15], где  $P_1$  – сила давления луча,  $P_2$  – сила тяжести,  $P_3$  – реакция отдачи при испарении металла,  $P_4$  – сила давления паров в канале,  $P_5$  – сила поверхностного натяжения,  $P_6$  – сила термокапиллярного напряжения,  $P_7$  – сила взаимодействия потока с поверхностью расплава.

На рис. 12 показано продольно-поперечное сечение сварочной ванны со схемой сил, действующих на жидкий металл внутри сварочной ванны: 1 – сварочный луч, 2 – основной металл, 3 – расплавленный металл,

4 - парогазовый канал, 5 - сварочный шов (I - передняя стенка канала, II - задняя стенка канала,  $U_{св}$  - скорость сварки).

Сила  $R$  определяется давлением электронов, и зависит она только от параметров потока энергии, нагревающей металл. Остальные составляющие силы, действующие на металл, определяются теплофизическими свойствами металла и его температурой.

Сила  $P_2$  является объемной силой,  $P_3$ ,  $P_7$  направлены тангенциально, а остальные силы - по нормали к поверхности жидкого металла в любой точке приложения. Рассмотрим значения давлений, оказываемых этими силами.

Давление луча, нагревающего металл, определяется соотношением [12]

$$P_1 = (-R) \frac{q}{v},$$

где  $R$  - коэффициент отражения частиц от поверхности, при ЭЛС  $R \sim 0,1$ ;  $q$  - удельная мощность в луче;  $v$  - скорость частиц (электронов в луче), для ЭЛС  $v = 5,9 \cdot 10^8 \sqrt{U_{уск}}$ , см/с;  $U$  - ускоряющее напряжение, В.

Гидростатическое давление определяется плотностью и высотой жидкого слоя  $P_2 = \rho g z$ , где  $\rho$  - плотность жидкого металла,  $g$  - ускорение свободного падения,  $z$  - глубина рассматриваемого уровня от поверхности ванны.

Давление отдачи при испарении можно оценить по следующему выражению

$$P_3 = g \cdot v_T \cdot \tau_{исп}^{-1},$$

где  $v_T$  - скорость движения атомов пара;  $\tau_{исп}$  - скрытая теплота испарения.

Среднее давление паров  $P_4$  в пародинамическом канале рассчитывается по соотношению

$$\lg P_4 = B - \frac{A}{T_{ср}},$$

где  $A, B$  - термодинамические постоянные данного металла,  $T_{ср}$  - средняя температура жидкого металла в ванне.



Поверхностное натяжение можно определить по формуле

$$P_s = \sigma \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right),$$

где  $\sigma$  - коэффициент поверхностного натяжения жидкого металла,  $R_1$  и  $R_2$  - главные радиусы кривизны поверхности в рассматриваемой точке.

Термокапиллярное напряжение определяется по формуле

$$R = \frac{\partial \sigma}{\partial T} \cdot \text{grad} T,$$

где  $T$  - температура поверхности жидкого металла.

Тангенциальные напряжения на поверхности жидкого металла, вызываемые потоком пара, истекающего из канала, определяются по соотношению

$$P = \mu \frac{dv_x}{dx},$$

где  $\mu$  - динамический коэффициент вязкости;  $v_x$  - скорость движения жидкого металла вдоль канала;  $x$  - координата, направленная от границы раздела твердой и жидкой фаз вглубь жидкого металла.

Считая, что скорость перемещения жидкого металла под действием тангенциального напряжения имеет линейное распределение поперек слоя, находим

$$\frac{dv_x}{dx} = \frac{v_0}{a_0},$$

где  $v_0$  - средняя скорость движения жидкого металла по поверхности расплава;  $a_0$  - толщина слоя расплава.

Скорость  $v_0$  определяется взаимодействием парового потока, который вырывается из канала навстречу пучку, с поверхностью расплава. Определяется эта величина для случая электронно-лучевой сварки, когда поток пара из канала выходит в вакуум. В этом случае [14] на поверхности жидкого слоя скорость течения металла

$$v_0 = \sqrt{\frac{P_s}{\rho}}.$$

Считая давление  $P_s$  равным давлению паров металла при средней температуре металла ванны, можно оценить  $v_0$ . Скоростной оценкой

процесса ЭДС (табл. 4) в нижнем положении определена высота подъема капель жидкого металла  $h$ , вылетающих из ванны, диаметр капель  $d$  и время  $t$  их вылета и падения. Режим сварки и съемки – материал Ст3,  $U_{уст} = 30$  кВ,  $I_n = 0,4$  А,  $U_{св} = 0,56$  см/с. Скорость съемки 1200 кадр/с. Капли вылетали практически вертикально.

Т а б л и ц а 4

Данные результатов киносъемки

Шар капели	$d$ , см	$h$ , см	$t$ , с	$U_{ср}$ см/с
I	0,114	0,307	$2,5 \cdot 10^{-2}$	18
II	0,27	0,41	$4,4 \cdot 10^{-2}$	25
III	0,007	0,147	$1,5 \cdot 10^{-2}$	12

Средняя скорость капли в момент отрыва всегда будет несколько ниже скорости  $U_0$ , так как капля обладает конечными размерами и на отрыв ее от жидкости затрачивается часть энергии пара. Следовательно, скорость  $U_0$  определена вполне достоверно.

На передней стенке канала жидкий металл движется в основном в пространстве потока пара. Толщина жидкого слоя на передней стенке на порядок меньше, чем на задней. Значения всех составляющих давления на жидкий металл в парогазовом канале, рассчитанные для случая сварки стали по ранее полученным данным [5-15], приведены в табл.5.

Т а б л и ц а 5

Значения составляющих давления на жидкий металл  
в парогазовом канале

Источник давления	Обозначение	Характерная величина, мН/см <sup>2</sup>
Поток энергии	$P_1$	5
Гравитация	$P_2$	$10^1 \dots 10^2$ (при сварке в нижнем положении)
	$P_3^0$	$10^4 \dots 10^5$
Отдача при испарении	$P_{3\text{уст}}$	$10^2 \dots 10^3$
Пар в канале	$P_4$	$10^2 \dots 10^3$

Источник давления	Обозначение	Характерная величина, $\text{МН/см}^2$
Поверхностное натяжение	$P_s$	$10^2$
Термокапиллярный эффект	$P_c$	3,25
Увлечение жидкости потоком пара	$P_p$	$10^{-1}$

Как видно из рис. II [15] и табл. 5, при сварке имеются лишь две силы, отталкивающие расплавленный металл из зоны воздействия сварочного луча: сила давления самого луча и реакция отдачи при испарении, причем последняя существенно переходит в первую. Особенно велика реакция отдачи в начальный период плавления, когда отсутствует углубление в жидком металле и площадь облучения равна площади поперечного сечения луча. После образования стационарного луча плотность мощности на поверхности канала становится примерно на два порядка меньше.

Трение потока пара о расплав обеспечивает перемещение жидкого металла в сварочной ванне в продольных и поперечных направлениях (рис. 12), так как имеются соответствующие тангенциальные составляющие или направления.

Движение расплавленного металла даже под действием таких слабых сил, как давление луча или термокапиллярное напряжение, происходит довольно интенсивно.

## 2. ТЕХНОЛОГИЯ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ

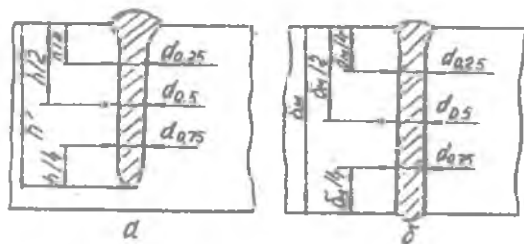
Обеспечение высокого качества сварных конструкций требует творческого подхода всех специалистов, участвующих в их создании, начиная от проектирования и кончая контролем качества и сдачи готовой продукции. Необходимые свойства сварных соединений достигаются с помощью различных технологических приемов, выбор которых осуществляет технолог-сварщик. Технические решения (тип соединения, требования к подготовке стыкуемых поверхностей, расположение сварных швов и др.) должны вводиться в чертежи изделия, а технологические приемы — в технологическую карту на сварку и полный цикл изготовления изделия.

Разработанная технология сварки определяет необходимое сварочное оборудование и технологическую оснастку. В ряде случаев сварка электронным пучком может быть финальной сборочной операцией. При этом отсутствуют припуски на окончательную механическую обработку благодаря незначительной деформации изделия и обеспечению требуемой внешней конфигурации сварных швов.

Качество шва при ЭЛС, как и при любом способе сварки плавлением, определяется совокупностью технологических и энергетических параметров процесса. Поддержание на требуемом уровне энергетических параметров процесса сварки обеспечивает при неизменных технологических условиях постоянство эксплуатационных параметров сварного соединения: геометрических размеров, структурных, прочностных и других показателей.

### 2.1. Геометрия поперечных сечений шва

Из рассмотрения специфических дефектов следует, что геометрия и качество швов при ЭЛС взаимосвязаны более сильно, чем при дуговых способах сварки. На рис. 13 даны поперечные сечения несквозного (а) и сквозного (б) проплавлений и приняты обозначения.



Р и с. 13. Геометрия поперечных сечений шва

Геометрию шва удобно характеризовать безразмерными параметрами — коэффициентом равномерности  $\gamma = d_{0.25}/d_{0.5}$ ,

$$\gamma = d_{0.5}/d_{0.75}.$$

Коэффициенты равномерности, глубина и средняя ширина являются основными параметрами шва. Безразмерные параметры  $\gamma_1$  и  $\gamma_2$  оценивают при этом склонность к образованию дефектов. При  $\gamma_{1,2} \approx 1$  шов в наибольшей степени равномерен по ширине на всей глубине. При  $\gamma_{1,2} < 1$  в верхней или нижней части шва имеется перетяжка — предвестник возможного образования ниже перетяжки дефектов в виде протяженных полостей или срединных трещин. При  $\gamma_{1,2} < 1$  и  $\gamma_1 > \gamma_2$  форма проплавления в поперечном сечении является клиновидной. Допустимость

или нецелесообразность клиновидной формы шва определяется в каждом конкретном случае совокупностью условий сварки: свариваемостью металла, его толщиной, наличием подкладки и т.д.

К основным энергетическим параметрам, определяющим геометрию и качество шва, относятся ускоряющее напряжение электронной пушки, ток или мощность электронного пучка, угол сходимости пучка, радиус и положение минимального поперечного сечения пучка, скорость сварки, точность совмещения пучка со стыком. Кроме того, каждый технологический прием может характеризоваться дополнительными энергетическими параметрами процесса сварки: формой и частотой колебаний пучка, скоростью и направлением подачи присадочного материала и т.д.

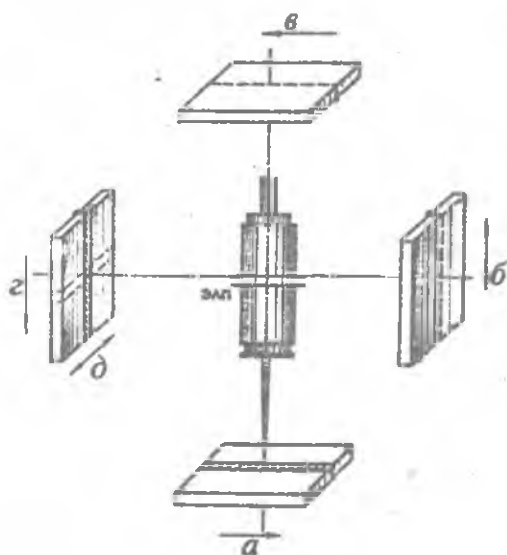
Из энергетических параметров процесса сварки наиболее существенное влияние на качество шва оказывает мощность пучка, положение его минимального сечения и скорость сварки. Стабилизация уровня фокусировки и мощности пучка электронов в процессе сварки обеспечивает стабильность как коэффициента равномерности шва, так и средней глубины проплавления. По мере увеличения толщины диапазон допустимых изменений уровня фокусировки пучка  $\Delta b$ . Для материала с  $\delta_n$  20...30 мм область значений лежит в диапазоне от  $-0,3$  до  $+0,5 \mu$ , причем значение  $\Delta b$  следует поддерживать с точностью не более  $\pm 0,5$  мм.

Оптимальное значение скорости сварки определяется, с одной стороны, условием минимальной интенсивности гидродинамических возмущений в ванне, а с другой, условием минимальной ширины шва для снижения деформации, повышения трещиностойкости, сохранения концентрации легкоиспаряющихся легирующих элементов в металле шва. Первое условие требует уменьшения скорости сварки, а второе — ее повышения. С увеличением толщины свариваемого металла оптимальная скорость сварки снижается. Так, если с  $\delta_n \approx 1$  мм удается сваривать с хорошим формированием шва при  $U_{св} \approx 70$  мм/с, то, например, сталь толщиной 100...200 мм нужно сваривать при  $U_{св} = 1...1,7$  мм/с, хотя современное энергетическое оборудование позволяет проплавливать сталь этой толщины, по крайней мере, на зтрое больших скоростях, однако с совершенно неудовлетворительным формированием шва — сильным выливанием металла, большими раковинами и т.д. Металл с  $\delta_n = 20...60$  мм удается сваривать с удовлетворительным формированием швов в широком диапазоне скоростей сварки — от 1,5 до 15 мм/с. Уточнение же этой скорости для получения необходимых свойств металла сварного соединения играет большую роль при разработке технологии сварки.

## 2.2. Особенности электронно-лучевой сварки в различных пространственных положениях

Успешная разработка и реализация принципов локального вакуумирования расширяет возможности электронно-лучевой сварки, особенно крупногабаритных изделий.

При монтаже металлоконструкций возникает необходимость выполнять швы в различных пространственных положениях. В этом случае при пере-



Р и с. 14. Схема экспериментов по проплавлению металла в различных пространственных положениях

ходе от нижнего к верхнему положению и от вертикального к потолочному изменяется направление действия силы тяжести, поэтому формирование шва possui некоторые особенности. Проплавление проводилось в следующих пространственных положениях (рис. 14) [16]:

нижнем (а) - направления силы тяжести и электронного пучка совпадают;

на вертикальной стенке (б) - сила тяжести перпендикулярна оси электронного луча и противоположна направлению переноса жидкого металла;

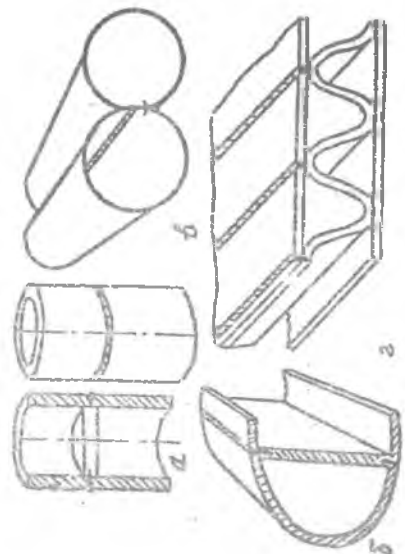
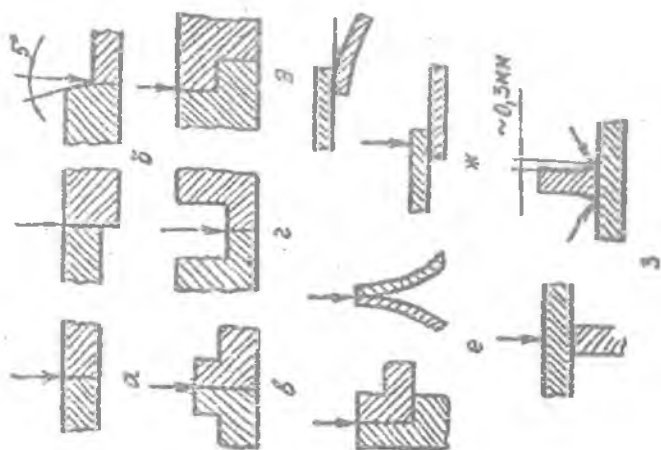
потолочном (в) - сила тяжести направлена противоположно действию луча;

на вертикальной стенке (г) - сила тяжести перпендикулярна электронному лучу, направления переноса металла и силы тяжести совпадают;

на вертикали на боку (д) - сила тяжести перпендикулярна электронному лучу, образец перемещается по горизонтали. ЭЛП - электронно-лучевая сварочная пушка.

Следует отметить, что последний случай - горизонтальные швы на вертикальной плоскости - примечателен минимальным влиянием силы тяжести на формирование швов; это позволяет моделировать электронно-лучевую сварку в условиях, близких к невесомости.

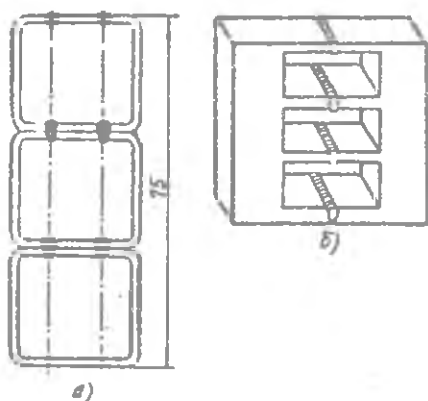
Р и с. 15. Типы соединений для ЭДС: а - ровностол-  
 шинный стык; б - разнотолщинный стык; в - стык с  
 отбортовкой кромок; г - стык с углублениями; д -  
 замковой стык; е - стыковое соединение тонкостен-  
 ных деталей; ж - нахлесточное соединение; з - тав-  
 ровое соединение



Р и с. 16. Конструкции, выполненные пропла-  
 вкой швами: а, б - сварка гелеметричных пере-  
 городок в трубах; в - сварка двух труб; г -  
 приварка газированной вставки к листам

Наиболее важными технологическими параметрами процесса сварки являются тип и геометрия стыкового соединения и пространственное положение сварного шва и электронного пучка. Для однопроходной ЭДС применяются типы соединений, в основном характерные для сварки плавлением (рис. 15.). Стрелкой показано направление воздействия электронного пучка, выполняются на металлах с  $\delta_n \leq 10$  мм.

Возможность более глубокого проплавления при электронно-лучевой сварке позволяет сваривать изделия большой толщины практически из любых металлов и сплавов (рис. 16). Получение глубокого проплавления при электронно-лучевой сварке дает возможность выполнять принципиально новые, более совершенные виды соединений, сварка которых обычными методами невозможна.



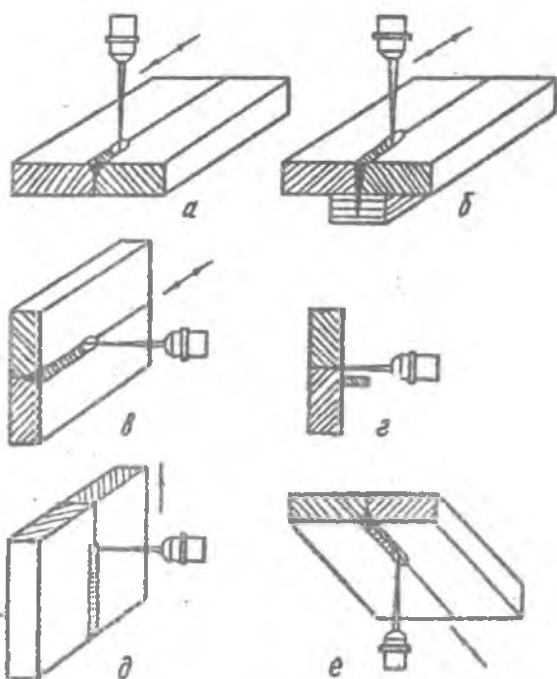
Р и с. 17. Конструкции, выполненные одновременной сваркой трех и четырех стыков

На рис. 17 приведены конструкции, сваренные путем одновременного проплавления трех (рис. 17,а) и четырех (рис.17,б) стыков. Возможность осуществления таких типов соединений электронным лучом позволяет снизить массу конструкции, повысить ее прочность, значительно упростить процесс изготовления изделий.

Сварка электронным пучком может успешно осуществляться (и широко применяется на практике) в нижнем положении, на боку, на подъем (рис. 18). Сварка в нижнем положении (вертикальным электронным пучком) выполняется как без подкладки (рис. 18,а), так и на подкладке (рис. 18,б) и применяется для соединения сталей толщиной до 40 мм, титановых и алюминиевых сплавов толщиной до 80 мм. Сварка на боку (рис. 18,в) и на подъем (рис. 18,д) выполняется горизонтальным электронным пучком для металлов любой толщины без подкладки.

Для предотвращения вытекания жидкого металла из сварочной ванны иногда устанавливается ограничительная планка вдоль нижней кромки стыка (рис. 18,г). Сварка в потолочном положении (рис. 18,е) выполняется на металлах толщиной до 20 мм и применяется чрезвычайно редко.





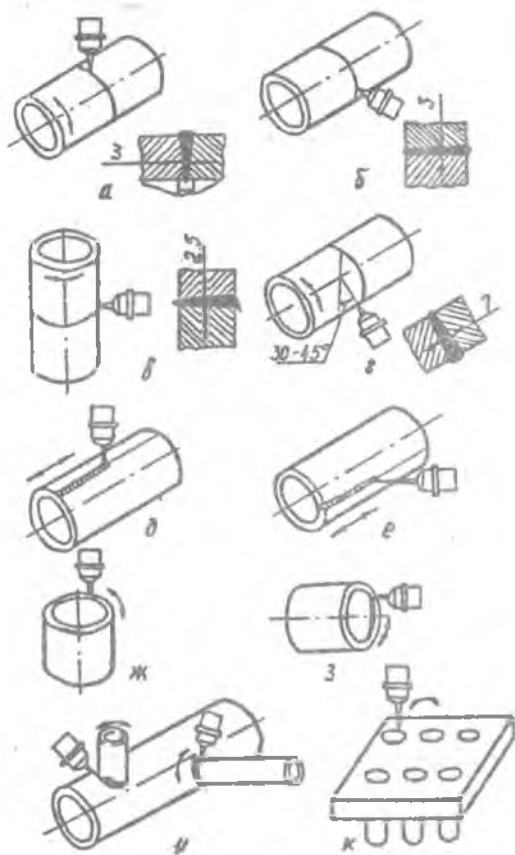
Р и с. 18. Общие технологические схемы ЭЭС

Типичные практические примеры технологических схем ЭЭС тел вращения показаны на рис. 19 и 20.

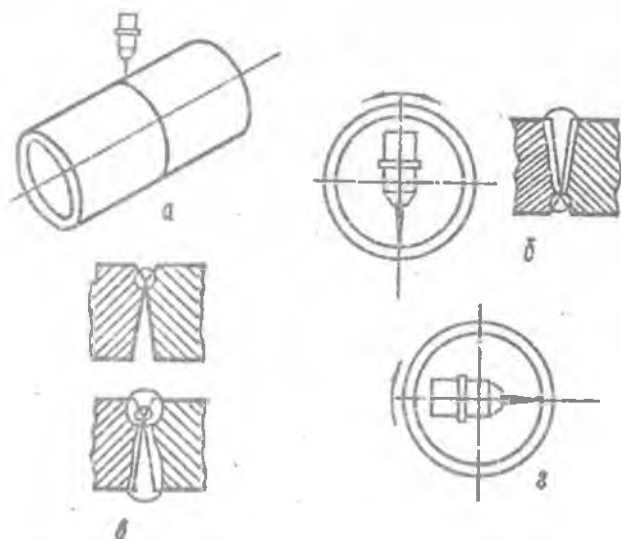
### 3. СВАРКА АЛЮМИНИЯ И ЕГО СПЛАВОВ

#### 3.1. Свойства свариваемых алюминиевых сплавов

Алюминиевые сплавы по своим физико-механическим свойствам являются наиболее важным конструкционным материалом в производстве летательных аппаратов. В зависимости от назначения их делят на деформируемые и литейные (табл. 6 и 7). Теоретической границей, разделяющей эти сплавы, служит предел растворимости элементов в твердом раство-



Р и с. 19. Технологические схемы сварки тел вращения с горизонтальной (а, б, г, д, е, з, и) и вертикальной (в, в, к) осями, вертикальным (в, д, ж, к), горизонтальным (б, в, е, з) и наклонным (г, и) электронными пучками



Р и с. 20. Технологические схемы внутритрубной сварки электронным пучком: а - дуговая прихваточная подварка наружной части стыка; б, г - сварка внутри вертикальным или горизонтальным электронным пучком; в - окончательная дуговая заварка наружной части стыка с одновременной перезваркой корневой части внутреннего шва

ре (рис. 21). Содержание легирующих элементов в деформируемых сплавах обычно не превышает 8...9%, т.е. меньше предела растворимости, и при нагреве они 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 [4]. В свою очередь, деформируемые сплавы алюминия условно разделены на две группы: неупрочняемые и упрочняемые термической обработкой. К неупрочняемым относятся сплавы алюминия с магнием типа АМгЗ, АМг5, АМг6 и др., сплавы с марганцем типа АМн и АМнС, а также чистый и технологический алюминий типа А995, АД0, АД1.

Повышение прочности неупрочняемых термической обработкой сплав достигается за счет легирующих материалов, имеющих в твердом растворе. Дополнительное упрочнение эти сплавы могут получать за счет

Химический состав деформируемых алюминиевых сплавов, %

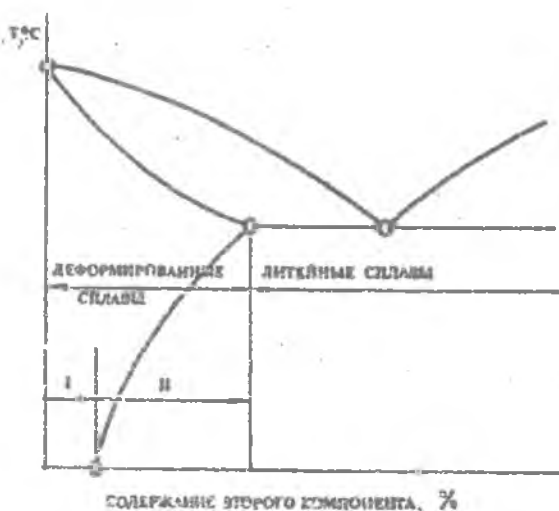
Состав	Центро- вая часть ковки	Cu	Mg	Mn	Fe	Si	Zn	Ti	Zr	Cr	Be
АК-1	И013	0,05	0,05	0-0,025	0,30	0,30	0,1	0,15	-	-	-
АМц	И400	0,15	0,2	1,0-1,6	0,7	0,6	0,1	0,2	-	-	-
АМБ2	И820	0,10	1,8-2,6	0,2-0,6	0,4	0,4	0,2	0,1	-	0,05	-
АМБ3	И530	0,10	3,2-3,8	0,3-0,6	0,5	0,5-0,8	0,2	0,1	-	0,05	-
АМБ4	И540	0,10	3,8-4,6	0,5-0,8	0,4	0,4	0,2	0,02- 0,10	-	0,05- 0,25	0,0002- 0,005
АМБ5	И550	0,10	4,9-5,8	0,3-0,8	0,5	0,5	0,2	0,02- 0,10	-	-	0,0002- 0,005
АМБ6	И560	0,10	5,8-6,8	0,5-0,8	0,4	0,4	0,2	0,2- 0,1	-	-	0,0002- 0,005
АМБ6I	И56I	0,10	5,5-5,6	0,7-1,1	0,4	0,4	0,2	-	0,02- 0,12	-	0,0001- 0,003
АВ	И340	0,1- 0,5	0,45- 0,9	0,15- 0,35	0,5	0,5-1,2	0,2	0,15	-	-	-
АК4	И140	1,9- 2,5	1,4- 1,8	0,2	0,8-1,3	0,5-1,2	-	0,1	-	-	-
В95	И950	1,4- 2,0	1,8- 2,8	0,2- 0,6	0,5	0,5	5,0- 7,0	-	-	-	-
-	И420	-	4,5-6,0	0,3	0,1- 0,3	0,1-0,3	-	0,1	0,09- 0,15	-	-
Д20	И20I	5,8- 6,8	0,02	0,2- 0,4	0,3	0,2	0,1	0,02- 0,1	0,01- 0,25	0,05- 0,15	-

Примечание: сплав АК4 содержит 0,8...1% Ni, сплав В95 — менее 0,1% Ni, сплав И420 — 1,7...2,3% Li, сплав Д20 — 0,05...0,15% U.

## Химический состав легких алюминиевых сплавов, %

Сплав	Mg	Si	Mn	Cu	Ni	Ti
АЛ2	—	10,0-13,0	—	—	—	—
АЛ9	0,2-0,4	6,0-8,0	—	—	—	—
АЛ10В	0,2-0,5	4,5-6,5	—	6,0-8,0	—	—
АЛ25	0,8-1,3	11,0-13,0	0,3-0,6	1,5-3,0	0,8-1,3	0,05-0,20
АЛ26	0,5-0,7	20,0-22,0	0,4-0,8	1,5-2,5	1,0-2,0	0,02
АЛ30	0,8-1,3	11,0-13,0	—	0,8-1,5	0,8-1,3	—

нагартовки в холодном состоянии. Так, например, сплав АМг6 имеет в стоженном состоянии временное сопротивление до 320 МПа, а после нагартовки на 20% этот показатель возрастает до 380...420 МПа.



Р и с. 21. Классификация алюминиевых сплавов по бинарной диаграмме

К термически упрочняемым деформируемым алюминиевым сплавам относятся сплавы, имеющие концентрацию легирующих элементов больше предела растворимости при комнатной температуре (рис. 21), которые помимо упрочнения от легирования твердого раствора такими элементами, как

медь, цинк, кремний и др., упрочняются также вследствие распада пересыщенных твердых растворов. Термическая обработка этих сплавов состоит обычно из закалки и старения. Их дополнительное упрочнение может осуществляться нагартовкой, выполняемой закалкой и старением. Временное сопротивление разрыву термически упрочняемых сплавов достигает 400...500 МПа и более.

Литейные алюминиевые сплавы в качестве основных легирующих элементов содержат кремний, медь, цинк, никель (табл. 7). Обычно литейные сплавы имеют низкую пластичность, вследствие чего деформировать такие сплавы нельзя. Поэтому их используют для получения деталей и различного рода заготовок преимущественно методами литья или шпикой штамповки. Механические свойства деформируемых и литейных алюминиевых сплавов зависят от состояния полуфабрикатов, вида термической обработки и способа отливки (табл. 8) [4].

Т а б л и ц а 8

Механические свойства алюминиевых сплавов

Деформируемые сплавы				Литейные сплавы		
Сплав	$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\delta, \%$	Сплав	$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\delta, \%$
АД1	120	80	15	АЛ2	150	4
АМг	180	130	10	АЛ9	190	4
АМг3	235	120	22	АЛ10В	160	-
АМг5	300	160	20	АЛ25	190	-
АМг6	380	280	6	АЛ26	160	-
АВ	350	290	12	АЛ30	200	0,5
АК4	420	350	10			
В95	560	530	8			
Л20Т	420	300	12			
Л42С	480	330	7			

При ЭМС термически упрочняемых или усиленно нагартованных сплавов алюминия особенно заметны преимущества этого способа по сравнению с дуговой сваркой. Как известно, коэффициент прочности таких материалов после аргоно-дуговой сварки обычно составляет 0,5...0,65 временного сопротивления разрыву основного материала. Для компенсации потери прочности при этом и обеспечения равнопрочности сварных соединений с основным металлом стык располагают на участке с утолщенными свариваемыми кромками. Утолщение обычно составляет до 100%

свариваемой толщины металла, а ширина утолщенного участка всегда должна превышать ширину зоны термического влияния ЗТВ. Это вызывает существенное возрастание массы сварных конструкций. Соединения же, выполненные ЭЭС, имеют временное сопротивление разрыву на 15...25% выше, а ширину ЗТВ в 2...3 раза меньше, чем при дуговых способах. Это позволяет значительно уменьшить массовые характеристики сварных конструкций.

Сварку алюминиевых сплавов электронным лучом можно осуществлять на весу и в различных пространственных положениях без применения подкладных или формирующих устройств, так как вследствие высокой теплопроводности этих сплавов сварочная ванна имеет малый объем жидкого металла. Это важно при сварке конструкций, требующих гарантированное проплавление стыка на всю толщину при отсутствии доступа к обратной стороне стыка. Ударная вязкость металла шва на алюминиевых сплавах всегда выше, чем у основного металла, а условный предел текучести практически сохраняется на уровне этих свойств основного металла [18, 19, 20, 21, 22].

### 3.2. Подготовка заготовок и свариваемых кромок

Перед сборкой и сваркой кромки деталей и прилегающие к ним участки шириной не менее 10 мм тщательно зачищают от окисной пленки. Лучшим способом зачистки кромки является шабрение. Эта операция обычно выполняется вручную. За критерий оценки качества шабрения принимается полное удаление следов предыдущей обработки. При этом поверхность кромок должна быть гладкой, блестящей, без матовых пятен и темных полос. Чтобы уменьшить трудоемкость выполнения операции по ручному шабрению, механическая обработка кромок под сварку должна осуществляться с шероховатостью 6-го класса без применения смазывающе-охлаждающих жидкостей и эмульсий. Забоины, вмятины, глубокие царапины на свариваемых кромках недопустимы, так как удалить окисную пленку в таких металлах полностью не удается. Чтобы предотвратить внедрение разрушенной окисной пленки в поверхность обрабатываемых кромок, движение шабером осуществляют плавно только в одну сторону (на себя). Острые кромки притупляются также шабером на небольшую глубину. Стружка и металлическая пыль после шабрения удаляется сухой жесткой кистью. Касаться после этого руками шабренных поверхностей запрещено.

Чтобы уменьшить загрязнение подготовленных под сварку конструкций, следует отводить отдельные участки, оборудованные специальными

стапелями, на которых устанавливаются и закрепляются при шабрении элементы сварных конструкций.

Очистка всей поверхности алюминиевых деталей обычно осуществляется травлением в щелочных ваннах в следующем порядке:

травление в растворе щелочи (едкий технический натрий 45...55 кг/м<sup>3</sup>) при температуре 333...343 К; продолжительность травления 1...3 мин;

промывка в горячей проточной воде при температуре не ниже 323 К, а затем в холодной проточной воде;

осветление в 30%-ном растворе азотной кислоты в течение 1...3 мин при комнатной температуре;

промывка в горячей проточной воде с последующей естественной сушкой.

Сварочную присадочную проволоку, а также малогабаритные заготовки после щелочного травления по описанной технологии рекомендуется подвергать химической или электрохимической полировке вместо шабрения.

Иногда сварочные заготовки после операций контроля повторно поступают на участок сварки для устранения обнаруженных дефектов. В этом случае требования по подготовке поверхности швов к подварке такие же, как и при подготовке свариваемых кромок, только при этом учитываются чешуйчатость шва и возможное занижение его поверхности. Кроме шабера может потребоваться пневмошина и шарошки. Участки подварки должны быть тщательно зачищены шабером или шарошками до полного удаления окисного слоя в зоне подварки. Шабрение кромок рекомендуется выполнять непосредственно перед загрузкой заготовок в вакуумную камеру. Допустимые сроки хранения деталей или сварочной проволоки, подготовленных под сварку химическим полированием, могут достигать нескольких дней при условии, что они хранятся чистыми и сухими в упакованном виде.

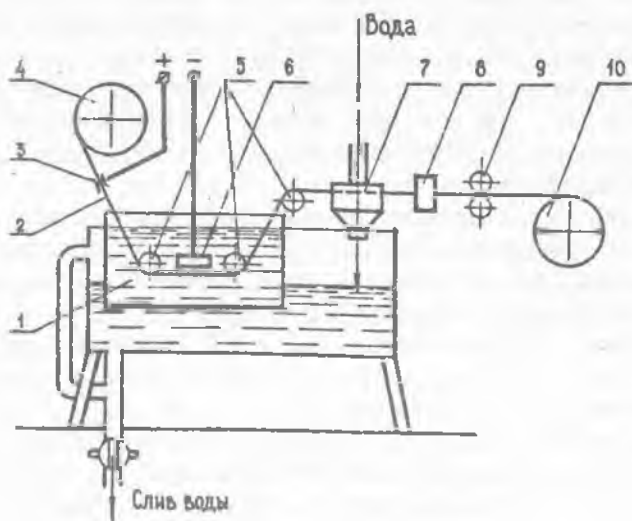
#### Подготовка поверхности проволоки под сварку

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, при-



нятой для обезжиривания и травления поверхности основного металла. Дополнительная обработка может быть различной: вакуумная сушка, химическое или электрохимическое полирование проволоки.



Р и с. 22. Схемы установки МАТИ для полирования проволоки

Электрохимическое полирование может производиться на установке МАТИ, схема которой показана на рис. 22 [23]. Проволока, предварительно обработанная в растворе  $\text{NaOH}$ , с кассеты 4 подходит к роликам 5 через ванну с электролитом I. На проволоку 2 через муфту 3 от источника постоянного тока подается положительный потенциал. В ванне на участке между катодами 6 проволока полируется, затем промывается водным душем, протирается в установке 8, обдувается горячим воздухом и наматывается роликами 9 на кассету 10.

В качестве электролита использован раствор следующего состава: 700 мл  $\text{H}_3\text{PO}_4$ , 300 мл  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , 42 г  $\text{CrO}_3$ . Температура электролита в процессе полирования проволоки  $95 \dots 100^\circ\text{C}$ . При перегреве электролита выше  $100^\circ\text{C}$  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 диаметром 1,6 мм возможно при величине тока 19,8 А.

В ИЭС им. Е.О.Латона и на кафедре электрохимии Киевского политехнического института разработан новый эффективный способ подготовки поверхности проволоки под сварку [24]. Способ заключается в обезжиривании в водном растворе едкого натрия в присутствии эффективных ингибиторов при 90...150°C в одном растворе смеси щелочной, азотной кислот с добавлением пассивирующих веществ, гидробезвредных 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. 9 [24] приведены результаты испытаний проволоки из сплава АМГ6, обработанной различными способами на оптимальных режимах (выдержка от обработки до испытаний не превышала 8 часов).

Т а б л и ц а 9

Результаты испытаний проволоки из сплава АМГ6

Способ обработки	Поверхностный водород, см <sup>3</sup> /100	Относительная толщина окисного слоя, Å	Шероховатость		Окисление в швах, %	Поверхность
			высота неровностей, 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	—
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 минимальный окисный слой. Чистота обработанной поверхности и 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.

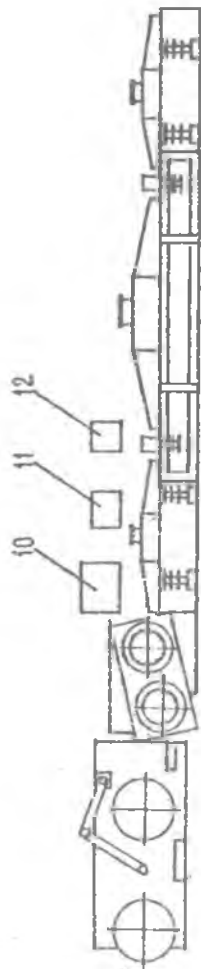
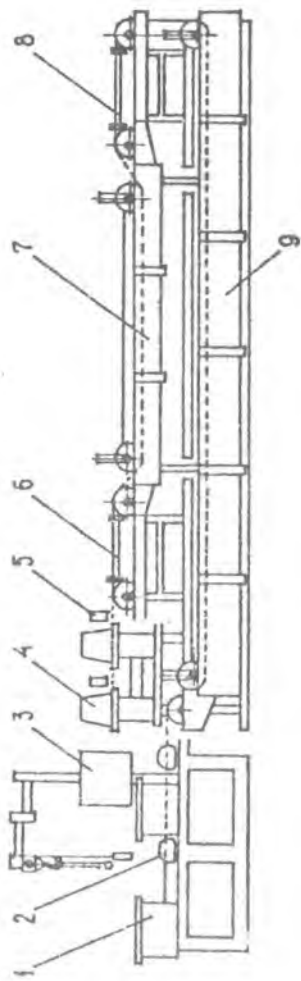
В ИЭС им. Е.О.Патона разработана технология механизированной электрохимической очистки (ЭХО) поверхности сварочной проволоки в ваннах с бесконтактным биполярным токопроводом [25]. Все технологические операции (размотка проволоки, обезжиривание, электрохимическое полирование, промывка, сушка) осуществляются при непрерывной протяжке проволоки через соответствующие устройства специализированной установки, управление которой производится с централизованного пульта. Жидкостный токопровод бесполярной ванны обеспечивает равномерное распределение плотности тока по длине проволоки, исключает электроэрозионное разрушение поверхности металла. Введение высокоактивных поверхностно-активных веществ в состав электролита повышает чистоту обработки проволоки, увеличивает производительность процесса ЭХО и позволяет вести качественное электрополирование при температурах (50...60)°С.

Двухнитевая установка ОБ 2Г75 для электрохимической очистки сварочной проволоки из алюминиевых сплавов (рис. 23) состоит из разматочного 1 и натяжного 2 устройств, ванны щелочного обезжиривания 9, промывочных устройств 6 и 8, ванны электрохимической очистки 7, электросушилки 5, наматочного устройства 4, пульта управления 3, источника питания переменного тока 10, шкафа управления П1 и стыковой сварочной машины 12 типа ИС403.

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.

### 3.3. Элементы технологии и режимы сварки

Алюминиевые сплавы толщиной до 20 мм могут свариваться в нижнем положении. Сварка металла толщиной 20...150 мм выполняется горизонтальным пучком снизу вверх или в горизонтальной плоскости, а сварка



Р и с. 23. Общий вид установки ОБ 2175 для электрохимической очистки сварочной проволоки

металла толщиной более 150 мм – горизонтальным пучком на подъем.

При сварке электронным пучком алюминиевых сплавов в различных пространственных положениях не было установлено заметного различия по глубине проплавления. Вместе с тем было показано [19, 21], что при горизонтальном положении пучка улучшается качество формирования соединений, снижается величина занижения поверхности металла шва при полном проплавлении стыка, менее критичным становится изменение мощности пучка. Было показано [21, 26], что увеличение тока сварки даже на 50% оптимального значения не приводит к заметному нарушению условий формирования и ухудшению качества соединений. Наблюдается лишь разбразгивание и наличие брызг с обратной стороны стыка.

На качество формирования горизонтальных швов заметно влияет угол наклона пучка к стыку [18, 21]. В случае сварки заготовок толщиной до 150 мм лучшие результаты достигаются при сварке углом вперед. В зависимости от толщины свариваемого металла угол наклона пучка изменяется от 5 до 15°.

При выполнении вертикальных швов на подъем на заготовках толщиной 40...250 мм для предотвращения образования внутренних дефектов в виде пустот и уменьшения вытекания жидкого металла электронный пучок в процессе сварки отклоняют на 5...17° от горизонтального положения вниз.

Для обеспечения нормальных условий формирования шва в начале и конце стыка достаточно, чтобы размеры вводно-выводных планок были 50x50xδ мм. Крепятся они к свариваемым заготовкам на прихватках, выполняемых дуговой сваркой. Если же это может повлечь нарушение коррозионной стойкости свариваемых заготовок в местах прихваток или привести к разупрочнению, их крепят с помощью сварочных приспособлений, обеспечивая полное прижатие к торцам стыка. Выполнение протяженных прямолинейных или кольцевых швов, даже если сварка осуществляется в оснастке, требует наложение прихваток по длине стыка. Прихватки накладываются, начиная с середины стыка, а при сварке кольцевых стыков – в диаметрально противоположных точках. В зависимости от габаритов изделий и толщины свариваемых элементов в технологическом процессе должны быть указаны места расположения и очередности наложения прихваток, также их протяженность и расстояние между ними. Мощность пучка задается в пределах 40...70% номинальной для канной толщины. Рекомендуемые длины прихваток и расстояние между ними для заготовок различной толщины приведены в табл. 10.

Т а б л и ц а 10

## Размеры прихваток, мм

Толщина материала	Длина прихваток	Расстояние между прихватками
3	10-15	250-300
5	15-20	350-400
10	20-30	350-400
20	25-40	400-500
40	40-60	500-600

При сварке алюминиевых сплавов с повышенным содержанием водорода и других газов применяется повторный проход. В этом случае второй проход выполняет функции рафинирующего передела для завершения процессов очистки металла шва, а также устраняет грубые дефекты формирования в виде раковин, несхлопнувшихся кратеров, которые обычно имеют место после первого прохода на алюминиевых литевых сплавах, не подвергавшихся рафинированию при первичной металлургической обработке расплава. Повторные проходы применяют при упрочняющей наплавке алюминиевых сплавов, когда требуется выравнивание химического состава по всему объему упрочненного слоя. Для интенсивного перемешивания металла в сварочной ванне повторный проход во всех случаях выполняется сканирующим пучком.

Для алюминиевых сплавов с толщиной до 40 мм оптимальным следует считать диапазон скоростей 10...20 мм/с. При сварке сплавов толщиной более 40 мм сварка может выполняться на скорости 10 мм/с. Рекомендуемые режимы сварки алюминиевых сплавов различной толщины даны в табл. II.

Т а б л и ц а II

## Рекомендуемые режимы ЭДС алюминиевых сплавов различной толщины

Марка сплава	Толщина, мм	Параметры режима сварки		Положение стика при сварке
		кВт	мм/с	
AlMg6	0,6	0,4	17	Низнес
	2	1,0	25	"
	5	1,7	20	"
	10	2,8	20	"
	30	6,3	10	"

Марка сплава	Толщина, мм	Параметры режима сварки		Положение стыка при сварке
		кВт	мм/с	
AMг6	100	21	4	Горизонтальные
	300	80	4	—"
I20I	5	2,7	20	Нижнее
	10	4,5	20	—"
	40	18	20	Горизонтальное
	100	30	6	—"
	250	105	6	Вертикальное
I420	350	110	3	—"
	5	0,7	15	Нижнее
	10	2,6	15	—"
	15	3,2	12	—"
	10	4,0	25	—"
В95	10	6,3	20	—"
АД0, АД1	16	5,3	17	—"

## Испарение легколетучих легирующих элементов

В алюминиевых сплавах содержится значительное количество легирующих элементов: магния (сплавы AMг3, AMг5, AMг6), цинка и магния (В95, АДМ), лития (ВКЛ23, I420), марганца (АМц, Д20) и др. Точки кипения этих элементов весьма низкие. При атмосферном давлении цинк кипит при 1186 К, магний — при 1376 К. Температура кипения сплавов, содержащих эти элементы, выше, однако она существенно ниже, чем у алюминия (2621 К). Малое давление в вакуумной камере создает благоприятные условия для испарения легирующих элементов с высокой упругостью паров [27, 28, 29]. Например, при 1000 К упругость паров алюминия над жидким металлом равна  $1,33 \cdot 10^{-5}$  Па, а магния —  $1,33 \cdot 10^3$  Па.

Однако при сварке на оптимальных режимах сплавов AMг6, В95, Д20 и I420 недопустимого уменьшения всех легирующих элементов не наблюдается. В табл. I2 представлены результаты спектрального анализа химического состава швов на сплавах AMг6 и В95 ( $v_{св} = 10$  мм/с) при различном давлении в рабочей камере. Видно, что с повышением давления в камере интенсивность испарения и потери легирующих элементов в процессе ЭДС снижается, т.е. сварку предпочтительнее выполнять при более высоком остаточном давлении в камере (1,33...66,5 Па).

Т а б л и ц а 12

Испарение легирующих элементов при различном остаточном давлении в сварочной камере

Металл	Остаточное давление, Па	АМГ6	В95
		Содержание легирующих элементов, %	
		Mg	Zn
Основной	-	6,35	5,64
Шов	$1,33 \cdot 10^{-2}$	5,42	4,85
"	1,33	5,77	5,12
"	53,2	5,96	5,37

Слабое влияние на химический состав шва оказывает и изменение скорости [30, 31]. Так, состав металла шва на сплаве Д20 практически не зависит от погонной энергии. На сплавах АМГ6 и В95 в металле шва уменьшается содержание наиболее летучих элементов (магния в сплаве АМГ6 и цинка в сплаве В95 с увеличением  $q/v_{св}$ ). Концентрация в этих сплавах элементов с более низкой упругостью паров несколько падает с уменьшением скорости сварки.

Временное сопротивление разрыву с увеличением количества проходов снижается на 10...30 МПа независимо от исходного состояния материала до сварки, даже на отожженном материале. Следовательно, основную роль в этом может играть только изменение состава металла шва, что подтверждается результатами спектрального анализа (табл. 13).

Т а б л и ц а 13

Химический состав сплава АМГ6 и металла шва при многократных проходах, %

Металл	Толщина, мм	Кол-во проходов	Присадка	Mg	Mn	Ti	Fe	Si
Основной	5			6,3	0,55	0,043	0,22	0,14
Шов	5	I	Не примен.	6,0	0,56	0,043	0,22	0,14
"	5	I	Применял.	6,0	0,58	0,040	0,21	0,11
"	5	2	Применял.	5,6	0,58	0,040	0,21	0,14
"	5	3	Не примен.	5,0	0,58	0,040	0,20	0,11
Основной	18	-	-	6,0	0,55	0,075	0,22	0,12
Шов	18	I	Не примен.	5,6	0,56	0,074	0,21	0,12



Металл	Толщина, мм	Кол-во проходов	Присадка	Mg	Mn	Ti	Fe	Si
Нов	18	1	Применял.	5,8	0,55	0,070	0,23	0,11
"	18	2	Применял.	5,5	0,57	0,070	0,22	0,10
"	18	3	Не примен.	5,4	0,56	0,070	0,22	0,10

После однократного прохода с присадочной проволокой или без нее содержание магния в шве сохраняется примерно на том же уровне, что и в основном металле. После двух- и трехкратного переплава шва количество магния уменьшается. Особенно заметны его потери, когда при третьем проходе присадочная проволока не использовалась.

#### 3.4. Сварка с присадочной проволокой

Присадка (проволока) может подаваться в головную или хвостовую часть сварочной ванны. При этом должен обеспечиваться обязательный контакт присадочной проволоки с поверхностью свариваемых пластин в месте встречи пучка с изделием. Если же между проволокой и изделием будет зазор, процесс протекает неустойчиво и происходит сильное разбрызгивание проволоки. Мунштук должен находиться на расстоянии 5...10 мм от пучка и направляться под углом 15...30° к поверхности свариваемых кромок. Сварочная проволока до сварки обрабатывается химическим или электрохимическим полдированием и укладывается на кассетах закрытого тига рядной намоткой.

В табл. 14 представлены режимы сварки ( $v_{св} = 17$  м/с) с присадочной. Мощность пучка при этом обычно на 20...30% выше, чем при сварке заготовок той же толщины без присадки. Применение присадочной проволоки при ЭДС сплава АМгб толщиной до 20 мм позволяет расширить зазоры в стыке до 0,5 мм. Наличие смещения кромок в меньшей мере сказывается на ухудшении формирования шва, чем увеличение зазоров.

Характер распределения значений твердости при различном исходном состоянии полуфабрикатов сплава АМгб свидетельствует о том, что твердость металла шва всех соединений находится на уровне твердости сплава АМгб в отожженном состоянии. Ширина участка разупрочнения усиленно нагартованных плит составляет 22...24 мм, включая ширину шва.

Т а б л и ц а 14

Оптимальные параметры однопроводной сварки сплава АМг6 с подачей присадочной проволоки диаметром 1,2 мм

Толщина пластины, мм	$P$ , кВт	$V_{\text{сп}}$ , мм/с	Ширина шва, мм
5	2,0	87	3,0
10	4,2	117	2,0
15	5,0	128	1,9
18	6,0	128	1,8

Распределение твердости при многократных переплавах одного и того же шва практически не изменяется. С увеличением количества проходов ширина участка разупрочнения нагартованных листов и плит увеличивается незначительно. Результаты механических испытаний свойств соединений (табл. 15) свидетельствуют, что применение присадки при однопроводной сварке сплавов АМг6 не оказывает заметного влияния на временное сопротивление разрыву по сравнению со сваркой без присадочного материала, независимо от вида полуфабриката и его состояния.

### 3.5. Деформация сварных конструкций из алюминиевых сплавов

Ввиду большого значения коэффициента линейного расширения и существенной усадки кристаллизующегося металла наряду с его низкими механическими свойствами уже при температуре 510...520 К технология сборки и ЭС алюминиевых сплавов должна предусматривать минимальные сварочные деформации и напряжения.

В работах [32, 33, 21, 34, 30] использовались поперечные укорочения и условия деформации алюминиевых сплавов АМг6, 1420 и 1201 толщиной 2...250 мм. Значение и распределение поперечных укорочений на сплаве АМг6 зависят от толщины свариваемых элементов и техники сварки. При однопроводной сварке поперечные укорочения возрастают с увеличением толщины свариваемых элементов, но они в 2...4 раза меньше, чем при аргоно-дуговой сварке на оптимальных режимах [32]. Применение присадочной проволоки на металле той же толщины возрастает с ростом поперечных укорочений в 1,5...2,5 раза. При ЭС сплава АМг6 поперечное укорочение заметно возрастает с увеличением погонной энер-

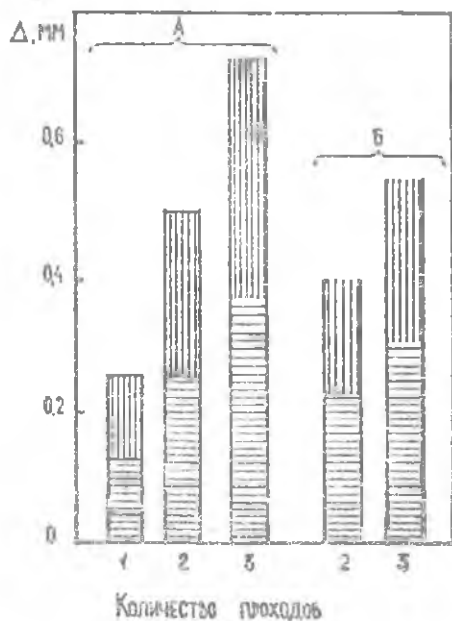
Механические свойства сварных соединений листов и плит из сплава АМг6

Сплав	Толщина, мм	Присажка	$\sigma_s$ , МПа	$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	КС, Дж/см <sup>2</sup>	$\frac{\sigma_{0.2}}{\sigma_{0.01}}$
АМг6Н	5	Не применялась	<u>320-332</u>	<u>269-284</u>	<u>11,3-16,6</u>	<u>22,6-42,4</u>	<u>25-33</u>	0,87
			331	277	13,3	34,9	29	
АМг6НН	15	Не применялась	<u>320-323</u>	<u>262-282</u>	<u>12,0-13,3</u>	<u>32,8-36,8</u>	<u>25-29</u>	0,84
			322	272	12,4	35,4	26	
АМг6НН	15	Не применялась	<u>355-361</u>	<u>180-286</u>	<u>5,0-5,0</u>	<u>27,7-29,4</u>	<u>20-25</u>	0,85
			359	282	5,3	28,3	22	
АМг6	15	Не применялась	<u>363-373</u>	<u>305-310</u>	<u>3,5-5,0</u>	<u>22,6-24,3</u>	<u>20-25</u>	0,87
			367	308	4,3	23,2	23	
АМг6	15	Не применялась	<u>348-369</u>	<u>173-186</u>	<u>11,4-12,8</u>	<u>11,6-13,5</u>	<u>20-22</u>	1,0
			357	177	12,1	12,6	21	
АМг6	15	Применялась	<u>307-369</u>	<u>148-172</u>	<u>15,0-18,4</u>	<u>19,0-32,8</u>	<u>26-30</u>	1,0
			346	163	16,7	25,9	27	

Примечание: Временное сопротивление разрыву основного металла при определении коэффициента прочности принималось в соответствии с ГОСТ 21631-76 и ГОСТ 17232-71 для какого состояния полуфабриката. Над чертой показаны предельные значения, под чертой - средние.

гил. Это происходит в основном за счет увеличения ширины ЗТВ. При ЭДС сплава АМГб толщиной 3 мм поперечные укорочения независимо от  $U_{св}$  стабилизируются за участке небольшой протяженности (70...120 мм) от начала стыка. При аргонно-дуговой сварке этот участок значительно длиннее, а укорочение при одной и той же скорости сварки в 3...4 раза выше.

Как и на сплаве АМГб, с увеличением погонной энергии поперечные укорочения на сплаве I20I возрастают. Угловые деформации тем выше, чем больше разница между поперечными укорочениями с лицевой и обратной стороны соединения. Исследования, проведенные на сплаве 210I



Р и с. 24. Влияние многократных переплавок шва на листе сплава I20I толщиной 10 мм по всему соединению длиной 300 мм (А) и на участке длиной 40 мм посредине соединения (Б) на поперечные укорочения с лицевой стороны шва (вертикальная штриховка) и с обратной стороны (горизонтальная прихватка)

толщиной 10 мм, показали, что с увеличением количества проходов поперечные укорочения пропорционально возрастают как с лицевой стороны шва, так и со стороны его корня (рис. 24). При исправлении дефекта переплавом локального участка в средней части соединения с полным проплавлением по толщине поперечные укорочения возрастают на этом участке, а их абсолютные значения меньше, чем при многократных переплавах соединения по всей длине шва.

Характер распределения и значения поперечных укорочений при сварке покровок I20I толщиной 100-250 мм сохраняет закономерности, описанные для листов и плит толщиной 10 и 40 мм. Деформация усадки с обратной стороны стыка даже при толщине покровок 250 мм не превышает обычно 0,5 мм. С лицевой стороны шва укорочения увеличиваются с ростом толщины исходных заготовок. Как следует из табл. 16, при сварке заготовок большой толщины технологические припуски на механическую обработку могут не превышать 5% толщины свариваемых элементов.

Т а б л и ц а 16

Поперечные укорочения при сварке электронным  
пучком поповок сплава I20I

Толщина заготовки, мм	Пространственное положение стыка	Поперечные укорочения, мм	
		с лицевой стороны шва	со стороны корня шва
100	Нижнее	0,4 - 0,5	0,2 - 0,3
150	Нижнее	0,8 - 0,9	0,1 - 0,2
250	Вертикальное	0,85 - 1,0	0,35 - 0,43

Примечание: Приведены средние результаты 3...5 измерений в 8...10 точках по длине шва 250 мм при базе измерения 100 мм.

Характер и величина деформаций конструкции зависят от толщины свариваемых заготовок, очередности наложения швов, наличия "косметических" швов. Результаты измерений остаточной деформации при различной толщине стыков представлены в табл. 17. Анализ этих результатов показывает, что при наложении швов в диаметрально противоположных точках имеет место усадка всего контура обечайки, и только со снижением общей жесткости конструкции за счет уменьшения толщины стенки до 65 мм появляются выпучивания стенки между швами. В случае последовательного наложения швов с интервалом через  $90^\circ$  выпучивания между швами имеют место независимо от толщины стенки обечайки. После двухмесячного вылеживания и естественного старения размеры сварных обечайки не изменились, т.е. достаточно технологического припуска в пределах 1...2% толщины стенок обечайки.

Т а б л и ц а 17

Остаточные деформации сварных обечайки из сплава I20I

Толщина стенки обечайки, мм	Деформации после сварки в местах замеров, мм			
	I	II	III	IV
65	-1,0	-1,0	+0,3	+0,2
80	-0,7	-1,1	-0,5	-0,5
110	-0,2	-0,4	+0,3	+0,3
110	-1,0	-0,8	-0,8	-0,1

- Примечания: 1. Внутренний диаметр и высота обечаек до сварки во всех случаях соответственно составляли 1440 и 500 мм.
2. Места замеров I-IV расположены с интервалом 45° по внешнему контуру обечаек, причем сварные швы находились в диаметрально противоположных местах.

### 3.6. Механические свойства сварных соединений

Прочность сварных соединений сплава АМц, технического алюминия составляет 95...100% прочности основного металла. Если сплавы до сварки упрочнены методом нагартовки или термической обработки, то при сварке под воздействием термического цикла происходит разупрочнение вследствие процессов рекристаллизации и распада твердого раствора. Степень прочности соединения зависит от состояния материала, в котором он находился до сварки (табл. 18).

Т а б л и ц а 18

Механические свойства сварных соединений листов сплавов Д20-1, В95

Сплав	Вид термообработки		$\sigma_b$ , МПа	K <sub>C</sub> , Ах/кгс	$\alpha$ , град	Коэффициент прочности
	до сварки	после сварки				
Д20-1 ( $\sigma_s = 2,5$ )	Закалка	Без обработки	295	23	84,5	0,95
	Закалка	Искусств. старение	328	18	61,0	1,0
	Закалка и искусств. старение	Без обработки	302	24	85,0	0,69
	"	Искусств. старение	335	19	63,5	0,77
	"	Закалка и искусств. старение	389	29	47,0	0,90
В95 ( $\sigma_s = 1,0$ )	Отжиг	Без обработки	237	8	-	1,0
		Закалка и искусств. старение	557	8	-	0,96
	Закалка и искусств. старение	Без обработки	448	4,5	-	0,77
		Искусств. старение	500	-	-	0,85

Для сплавов в термоупрочненном состоянии временное сопротивление разрыву металла шва непосредственно после сварки превышает  $0,7\sigma_B$  основного металла. В табл. 19 приведены свойства соединения плит из сплава I20I толщиной 40 мм [18]. Важно отметить, что условный предел текучести металла шва после ЭМС обычно равен соответствующему показателю основного металла, а ударная вязкость, полученная на образцах с надрезом Менаже по металлу шва, может даже превышать аналогичный показатель основного металла. Это объясняется радирующим действием вакуума. При снижении погонной энергии сварочного нагрева для сплавов AMg6, D20-I и B95 временное сопротивление разрыву и условный предел текучести металла шва заметно возрастают. У сплава AMg6H значения  $\sigma_B$  и  $\sigma_{0,2}$  при  $v_{св} = 5...25$  мм/с не ниже соответствующих показателей основного металла в отожженном состоянии и превышают максимальные значения свойств, обеспечиваемых аргоно-дуговой сваркой. В этом же диапазоне скоростей сварки ударная вязкость образцов сплава AMg6H в 2,0...2,5 раза выше, чем основного металла в нагартованном состоянии, а угол загиба  $\alpha = 160...180^\circ$ , что более чем в 2 раза превышает угол загиба основного металла в нагартованном состоянии.

Временное сопротивление разрыву сплава D20-I непосредственно после сварки превышает 0,75 аналогичного показателя основного металла в термически упрочненном состоянии. Последующая термобработка повышает коэффициент прочности до 0,99. Коэффициент прочности образцов сварных соединений B95 составляет 0,75...0,80. Последующее искусственное старение повышает временное сопротивление разрыву в среднем на 50 МПа. Аналогичные результаты были получены и при сварке плит I20I толщиной 40 мм. Наиболее чувствительными к разрушению в ЗТВ оказываются сплавы в усиленно нагартованном состоянии. В отличие от дуговых методов сварки, при ЭМС с увеличением толщины сплава I20I в 8 раз ширина участка разупрочнения возрастает лишь на 4...6 мм.

Алюминиевые сплавы широко применяются в конструкциях ответственного назначения. Прочность сварных соединений увеличивается при снижении температуры испытаний. Среднее увеличение их временного сопротивления при 4,2 К у основного металла составляет 30...55%, а у сварных соединений 45...65% в зависимости от состояния основного металла [18, 20, 34, 35]. Предел выносливости сварных соединений сплавов AMg6, AMg6H и I20I практически не зависят от исходного состояния материала или направления вырезки образцов относительно проката [36].

Таблица 19

Механические свойства сварных соединений плит из сплава I20I толщиной 40 мм

Вид термообработки		Температура испытания, К	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	КС, Дж/см <sup>2</sup>	$\frac{\sigma_{св}}{\sigma_{ос}}$
до сварки	после сварки							
Без термообработки	Без термообработки	293	218,5	164,6	11,2	44,2	34,6	1,0
Закалка	" "	77	332,2	207,8	17,1	19,2	25,4	1,0
		473	276,4	151,9	14,9	37,7	18,1	1,0
		293	296,9	193,1	7,6	30,6	27,2	0,98
" "	Искусств. старение	77	412,6	242,1	14,0	22,0	18,1	1,0
		473	321,4	253,8	4,3	26,8	15,4	1,15
		293	366,5	301,5	5,4	24,5	19,0	1,05
" "	Закалка и искусств. старение	77	430,2	306,6	3,5	9,6	13,6	1,05
		473	364,6	272,4	10,3	24,9	14,5	1,3
		293	456,7	357,7	7,5	19,8	15,4	1,4
Закалка и искусств. старение	Без термообработки	77	51,9	387,1	8,0	12,8	13,1	1,25
		473	265,6	205,8	7,6	32,1	15,4	0,77
		293	296,9	223,4	5,8	25,8	23,2	0,74
" "	Искусств. старение	77	406,7	296,9	7,5	21,0	14,1	0,78
		473	302,8	-	-	-	12,7	0,88
		293	343,1	269,5	3,7	22,1	12,7	0,85
		77	421,4	287,1	4,9	11,3	11,8	0,81

Окончание табл. 19

Вид термообработки		Температура испытания, К	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	КС, Дж/см <sup>2</sup>	$\frac{\sigma_{св}}{\sigma_{ос}}$
до сварки	после сварки							
Закалка и искусств. старение	Закалка и искусств. старение	473	356,7	274,9	11,1	26,8	10,9	1,0
		293	433,2	330,3	6,6	18,7	12,7	1,0
		77	532,1	417,6	9,3	15,9	14,8	1,0

Примечание. Индексы "св и ос" соответственно относятся к металлу шва и основному.



Иногда на практике возникает необходимость сварки различных алюминиевых сплавов. Исследования показали, что в этом случае временное сопротивление соединений всегда находится на уровне свойств основного металла, имеющего более низкие значения  $\sigma_b$ . Эта закономерность сохраняется и при более высоких температурах испытаний.

### 3.7. Основные дефекты сварных соединений

Наиболее распространенными дефектами сварных швов на алюминиевых сплавах являются трещины, поры, непровары, отклонения формирования шва, корневые дефекты и кратеры [38].

Трещины могут быть продольными по центру шва, продольными по границам оплавленной зоны или по основному металлу прилегающих участков, поперечными в металле шва и ЗТВ, усадочными. Продольные трещины могут быть вызваны либо повышенной склонностью сплавов к горячим трещинам под воздействием усадочных напряжений, либо несовершенством технологического процесса. Центральные трещины часто встречаются в начальных участках шва. Избежать продольных трещин удается, применяя присадочные материалы, обеспечивающие состав шва, стойкий против образования горячих трещин. Иногда причиной образования центральных трещин является большая сварочная ванна, тогда, даже применяя соответствующие присадки, их не всегда можно избежать.

Поперечные трещины обычно связаны с глубоким проплавлением и могут распространяться по слоям кристаллизации, где в условиях ЗТС имеют место химическая и структурная неоднородности металла шва. Иногда поперечные трещины распространяются в основной металл, прилегающий к границе оплавления. Распространению их в этом случае способствует наличие большого количества эвтектических выделений по границам зерен, имеющих, как правило, низкую температуру плавления. При резком длительном отклонении пушки вследствие высоковольтного пробоя в образовавшемся кратере возникают поперечные трещины, распространяющиеся по толщине свариваемых кромок, если имеются участки кратера, заполненные металлом.

Усадочные трещины в сварных швах алюминиевых сплавов являются главным образом следствием заужения поверхности металла шва и отсутствия усиления. При правильно разработанной технологии и конструкции соединений такие трещины не возникают. При многократных переделах одного и того же участка шва, в частности при исправлении дефектов,

целесообразно подавать в сварочную ванну специально попокранную присадку, повышающую стойкость металла шва против образования трещин.

Различают следующую пористость металла швов: равномерно распределенную; линейную вдоль оси шва или по границам оплавленной зоны; местную, т.е. на небольших участках шва; в виде удлиненной раковины, иногда выходящей на поверхность шва; в виде несхлопнувшихся кратеров.

Образование пор обычно связано с газовыделением, поэтому две последние разновидности отнесены к этой группе условно. Они представляют собой несплошности, в несколько раз превосходящие по размерам размер обычных пор. Причиной их возникновения является нарушение гидродинамических процессов в сварочной ванне при чрезмерном испарении металла или газовыделении. Для предупреждения их появления иногда достаточно изменить положение уровня фокусировки пучка, угол наклона пучка при сварке толстолистовых сплавов или пространственное положение стыка. В некоторых случаях результат оказывается положительным после переплава металла шва с разверткой пучка по окружности, превышающей размер дефекта.

Линейная пористость вдоль оси шва преимущественно сопутствует непровару корня шва и связана с влиянием влаги, адсорбированной поверхностными окисными пленками, прилегающими непосредственно к границе жидкого металла. Такая пористость легко устраняема правильным выбором режима, обеспечивающим полное проплавление стыка.

Равномерно распределенная или расположенная вдоль границ оплавленной зоны пористость может явиться результатом повышенного содержания растворенного водорода в основном металле, плохой подготовки и обработки свариваемых кромок, наличия на их поверхности оксидных пленок и пр. Химическое полирование свариваемых кромок и присадочно-проволоки сводит к минимуму пористость данного типа. Суммарный объем пор в швах на сплаве И20 после химической полировки практически не зависит от скорости сварки. С уменьшением скорости сварки сплава АМг6 от 25 до 3 мм/с объем пор в металле швов возрастает. Особенно резко пористость увеличивается при  $V_{св} < 9$  мм/с. Испарение магния сварочной ванны повышает давление его паров в пузырьке, что и способствует увеличению размера и количества пор. Лучшие результаты по плотности металла швов на сплавах И201 и АМг6 наблюдаются при сварке горизонтальных и вертикальных стыков при полном проплавлении без применения формирующих устройств [39, 21]. При сварке в потолочном положении с малой скоростью не удается устранить поры в швах путем снижения содержания водорода в основном металле АМг6. Это свидетельствует о том, что кроме водорода возникновению пор в швах способствуют в определенных

условиях и легирующие элементы (в данном случае магний). Повторные проходы сканирующим пучком снижают или вообще исключают распределенную пористость шва.

Причиной небольшого количества пор, расплывшихся на ограниченном участке шва, иногда являются неметаллические включения в основном металле, слезы масляных пятен от рук или забобы, где скапливаются загрязнения или остатки разрушенной при шаблении оксидной пленки. Исправление этой категории дефектов осуществляется, как правило, повторными проходами на всю глубину шва.

Выполнение сварки в нижнем положении при большой глубине проплавления и высоких скоростях кристаллизации металла шва затрудняет возможность выхода пузырьков газа на поверхность ванны. Другое пространственное положение шва — горизонтальное или вертикальное — способствует удалению пузырьков газа. Положительные результаты дает сварка с разверткой пучка по окружности малого диаметра.

Непровары и исправления кромок вызываются недостаточной мощностью пучка, смещением его относительно оси стыка, большими биениями механизмов вращения и перемещения изделия или пучка, расхождением свариваемых кромок под действием деформации или коробления свариваемых элементов из-за ненадежного их закрепления, неточностями при изготовлении и сборке деталей.

Дефекты типа непроваров очень сложно обнаружить рентгеноконтролем, так как поверхности кромок на участке непровара под действием напряжений очень плотно сжаты. Лучшие результаты получают при ультразвуковой дефектоскопии. Исправляют дефекты после их обнаружения повторным переплавлением шва.

К отклонениям формирования соединений относятся подрезы, неравномерная высота усиления вдоль оси шва, наплывы жидкого металла, отсутствие усиления или занижения поверхности металла шва. Подрез может располагаться с одной или двух сторон шва. Кроме завышения мощности пучка, несоответствия скорости сварки или подачи присадочной проволоки заданным параметрам причиной возникновения подрезов при ЭДС алюминиевых сплавов очень часто является испарение таких элементов, как цинк, магний, литий. Свечи иногда связаны с временной задержкой пучка на одном месте. На рентгенограммах иногда свечи можно ошибочно принять за пористость. При их исправлении обычно стремятся к гарантированному полному проплавлению во втором проходе. Утяжки встречаются редко, только при расфокусировке пучка. Наибольшей склонностью

к образованию этих дефектов обладают нахлесточные, стыковые швы на подкладке и со сквозным проплавлением, когда между соединяемыми элементами имеется зазор. Утяжины трудно обнаружить и практически невозможно устранить.

Корневые дефекты шва имеют место при неполном проплавлении свариваемого металла по толщине. Сканирование пучка на некоторых сплавах (типа АД1, 1201) снижает пикообразование. На сплавах типа АМг6 корневые дефекты при этом исчезают, но образуются подрезы. Для снижения отрицательного влияния корневых дефектов прибегают к различного рода конструктивным мерам. Самым распространенным является применение удаляемых подкладных планок, колец или выступов на одной из свариваемых деталей, в которые выводят корневые дефекты. Иногда в деталях, располагающихся ниже стыка, выполняют канавки или проточки, обеспечивая тем самым двухсторонний выход газов и паров металла и формирование в этих канавках обратного валика.

Другим крайне опасным специфическим дефектом при ЭЭС является кратер. Причиной выброса жидкого металла могут служить просои, чрезмерно загрязненная поверхность кромок по толщине.

Несплавления между отдельными слоями металла иногда удается определить ультразвуковым контролем. В основном этот дефект является следствием неправильно выбранных параметров процесса и техники сварки. Для появления слоистой структурной неоднородности металла шва целесообразно некоторое увеличение объема сварочной ванны, в том числе за счет уменьшения скорости сварки, развертки пучка или повышения его мощности.

Расслоение металла в ЭТВ является достаточно распространенным дефектом, нарушающим герметичность сварного соединения при герметизации приборов по тонкостенным буртикам. Повышение качества основного металла и снижение погонной энергии способствуют исцелению этого дефекта.

Окипные пленки и включения в таких размерах и количествах, как при дуговой сварке, при ЭЭС алюминиевых сплавов не встречаются.

Контроль соединений, выполненных электронным пучком, из-за ограниченности зоны оплавления и зачастую большой толщины изделия при отсутствии полного проплавления очень затруднен, и это необходимо учитывать еще на стадии конструирования.

### 3.8. Особенности сварки наиболее нагруженных стыковых швов крупногабаритных цилиндрических обечаек из термически упрочняемого сплава I20I

С учетом значительных габаритов узлов ЭЭС с использованием камер общего вакуумирования неприемлема по технологическим и экономическим соображениям. В производственных условиях разработан и осуществлен более рациональный технологический процесс ЭЭС в камере местного вакуумирования [40].

Для обеспечения высокой точности изготовления конструкции, облегчения сборки элементов и снижения металлоемкости оснастки сварку целесообразно осуществлять с минимальным перемещением узла. Это вызывает необходимость выполнения соединений в различных пространственных положениях. Применительно к обечайкам, например, требуется сварка вертикальных швов горизонтальным лучом.

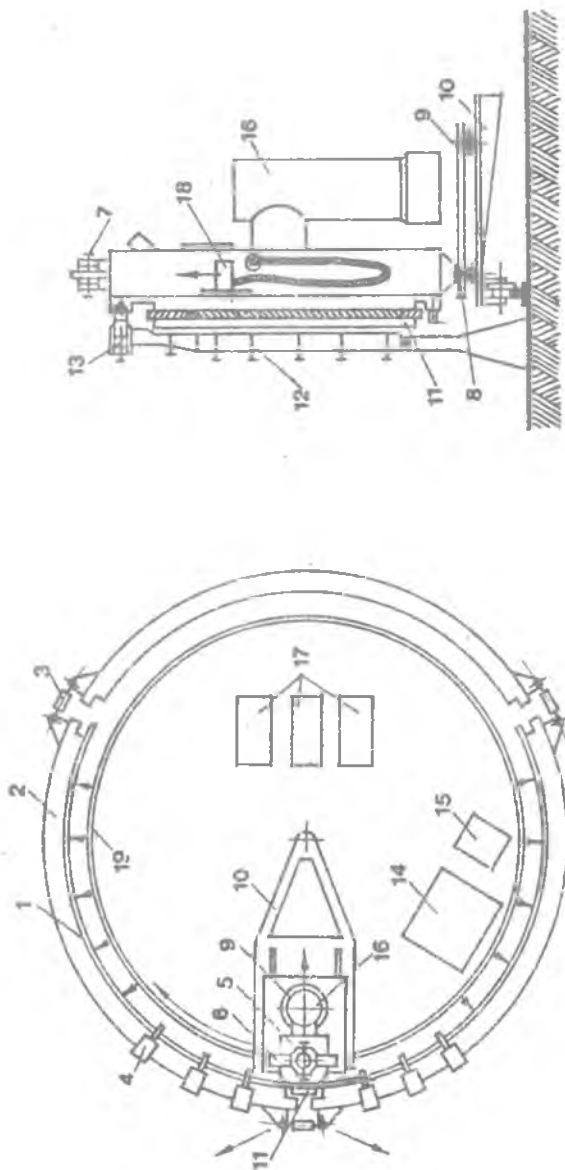
С учетом этих требований разработаны специальная камера, сборочный стапель для комплексного решения вопросов сборки соединяемых элементов, их совместной механической обработки, совмещения траектории перемещения электронно-лучевой пушки с плоскостью свариваемого стыка, вакуумирования и самого процесса сварки (рис. 25). Все операции выполняются с одной установки, секций обечайки в опорах стапеля, что обеспечивает необходимые условия прилегания свариваемых кромок.

В качестве энергетического оборудования использованы электронно-лучевая пушка ЦЭП-4 и источник питания У-250А. Для обеспечения необходимой степени разрядки в рабочей зоне ( $133 \cdot 10^{-4} \dots 133 \cdot 10^{-5}$  н/м<sup>2</sup>) применено стандартное вакуумное оборудование, используемое в составе электронно-лучевых установок с камерами общего вакуумирования.

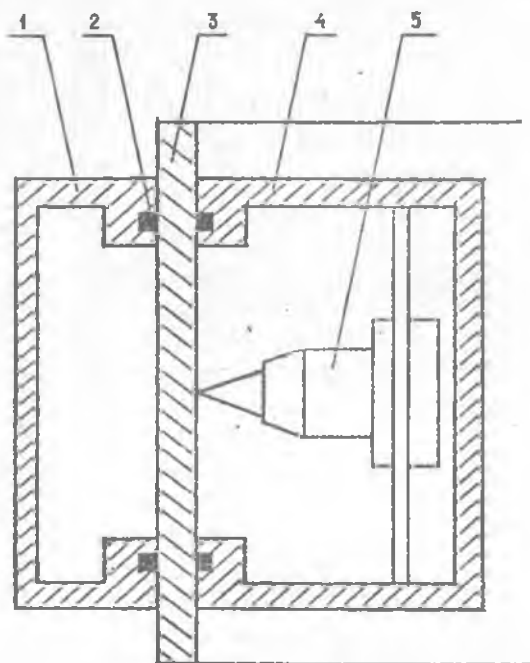
Разработан эффективный и простой метод герметизации стыков, вводных и выводных пластин со свариваемыми деталями с помощью резиновых уплотнителей (рис. 26).

Проведены исследования по изысканию оптимальных режимов и условий ЭЭС с учетом особенностей изделий и используемого оборудования. Основные параметры режима изменялись в следующих пределах: скорость сварки 25...50 м/ч; ускоряющие напряжения — 25...30 кВ; положение фокального пятна  $\pm 40$  мм от поверхности; ток луча до 300 Ма; наклоны луча в плоскости сварки  $\pm 3^\circ$ .

Сварка выполняется без технологической подкладки при свободном формировании обратного валика. При этом имеется возможность сузить о



Р и с. 25. Схема установки для ЭЛС провольных швов обечайки; 2 - опорное кольцо станала; 3 - стягивающее устройство; 4 - пневмоцилиндр; 5 - вакуумная камера; 6 - траверса; 7 - регулировочный узел; 8 - шаровая опора; 9 - стол; 10 - поворотная плашка; 11 - задняя крышка; 12 - упор; 13 - причальный узел; 14 - источник шлама У-250А; 15 - станция управления; 16 - высоковакуумный агрегат; 17 - форвакуумные насосы; 18 - электронно-лучевая пушка.



Р и с. 26. Схема электронно-лучевой сварки с местным вакуумированием: 1 - вспомогательная камера со стороны корня шва, формируемого "на весу"; 2 - вакуумные уплотнения; 3 - свариваемое изделие; 4 - основная камера со своим вакуумным уплотнением; 5 - электронно-лучевая пушка

характере проплавления по внешним признакам шва, что представляет определенную ценность.

Для поглощения остаточной энергии луча на задней крышке вакуумной камеры устанавливается пластина одноразового использования из материала, соответствующего марке свариваемого сплава. Расстояние от ее поверхности до свариваемых деталей не менее 15 мм. Многократное применение пластин из меди и других металлов нерационально в связи с интенсивным напылением инородного материала на обратную сторону шва.

Результаты сварки оценивались по следующим критериям: стабильность процесса, плотность сварного соединения, воспроизводимость ре-

зультатов, характер обратной стороны шва, прочность сварного соединения, чувствительность к производственным отклонениям. Наилучшие результаты по большинству критериев получены при скорости сварки 25...30 м/ч; ускоряющем напряжении  $25 \pm 5$  кВ и положении фокального пятна на 20...30 мм ниже лицевой поверхности свариваемого металла. Недостатком этого режима сварки является относительно большое занижение шва на лицевой стороне – до 3,5 мм. Для его устранения применена сварка с дополнительным выравнивающим проходом.

Особенностью принятой технологии является сплошная прихватка стыка. Это позволяет исключить возникновение в процессе сварки чрезмерных зазоров.

Параметры оптимального режима ЭЛС сплава I20I толщиной 20 мм на вертикальной плоскости горизонтальным лучом приведены в табл. 20.

Т а б л и ц а 20

Оптимальные параметры режимов

Проходы	Скорость сварки, м/ч	Ускоряющее напряжение, кВ	Ток луча, мА	Положение фокального пятна, мм	Поперечные колебания луча	
					частота, Гц	амплитуда, мм
Прихватка	45±1	25±0,5	110±5	45±5	-	-
Сварка	30-1	25±0,5	270±10	-25±5	-	-
Выравнивание	45±1	25±0,5	140±5	-50±5	50	2±0,5

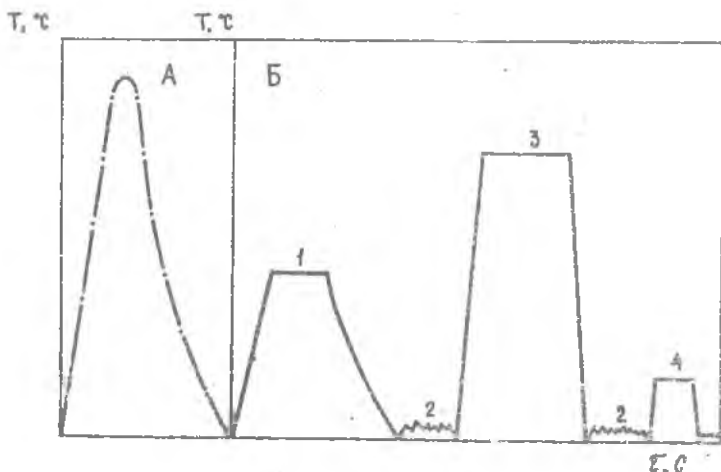
Сварные соединения, полученные на оптимальном режиме, обладают высокой плотностью. Внутренние дефекты практически отсутствуют. Предел прочности соединений составляет 320...348 МПа, что превышает на 70% фактическую прочность основного материала. Зона разупрочнения достигает ширины около 10 мм от центра шва.

Разработанная технология успешно внедрена в производство. Спыт предприятия показывает, что применение камер местного вакуумирования является наиболее эффективным способом осуществления ЭЛС при производстве крупногабаритных конструкций.



### 3.9. Возможности изготовления обечаек большого диаметра из сплава I20I с равнопрочностью сварных швов

В ИЭС им. Е.О.Патона разработан и осуществлен способ изготовления обечаек из сплава I20I с механическими свойствами шва после старения на уровне свойств основного металла в термически упрочненном состоянии, создан новый технологический процесс изготовления сварных конструкций с заданными свойствами [41].



Р и с. 27. Примерная схема последовательности операций сварки и термической обработки сварных обечаек: А — термический цикл электронно-лучевой сварки; Б — термо-механическая обработка; 1 — отжиг сварных заготовок; 2 — одно- или двухступенчатая деформация обечаек раскаткой; 3 — нагрев и выдержка под закалку; 4 — искусственное старение

Сварка продольного шва тонкостенных обечаек осуществлялась стационарным электронным лучом мощностью 20,5...33,6 кВт при  $U_{\text{э}} = 20$  м/ч вертикальными швами на подьем с полным проплавлением. Затем осуществлялась термомеханическая обработка цилиндрических заготовок по схеме: отжиг, деформация, закалка, искусственное старение. Примерная схема последовательности операций сварки, термомеханической обработки сварных обечаек приведена на рис. 27.

Свойства основного металла и сварных соединений в состоянии го пластической деформации представлены в табл. 21.

Т а б л и ц а 21

Механические свойства основного металла и сварных соединений сплава I20I по пластическим деформациям

Голщина заготовки	Металл	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\Delta K$ Дж/см <sup>2</sup>
10	Основной	218	215	11,2	30,3
	Соединение	217	215	7,9	30,8
95	Основной	174	119	10,2	25,5
	Соединение	172	118	8,7	24,8

Механические характеристики сплава I20I и его соединений после термомеханической обработки приведены в табл. 22, 23, 24 [42]. Механические испытания проводились на образцах, вырезаемых из трубчатых заготовок после раскатки.

Т а б л и ц а 22

Механические свойства сварных соединений из сплава I20I после окончательной деформации и термического упрочнения

Цикл термомеханической обработки	Шов			Основной металл		
	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\sigma_B$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %
Отжиг	177	127	12,1	188	118	20,2
Отжиг-раскатка по режиму 2, закалка	336	192	22,2	332	193	25,0
То же и старение	432	300	17,1	444	304	21,5
Отжиг-раскатка по режиму 2, раскатка по режиму 4	475	444	8,7	455	425	7,3
То же и старение	508	462	9,7	499	455	9,8
Отжиг-раскатка по режиму 2, закалка-раскатка по режиму 6	459	424	8,1	474	450	10,4
То же и старение	505	559	9,8	487	450	10,0

Из табл. 22 видно, что независимо от предварительной деформации достаточно осуществить с определенной степенью окончательную деформацию, чтобы обеспечить механические свойства шва после старения на

уровне свойств основного металла в термически упрочненном состоянии. Как показали испытания, равнопрочность обеспечивается и в условиях криогенных температур.

Т а б л и ц а 23

Механические свойства сварных соединений раскатанных обечаек из сплава I20I после термомеханической обработки без разделения деформации на предварительную и окончательную

Цикл термической обработки	$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\sigma_{0.2}$ , МПа	$\delta$ , %
Закалка	366	249	7,6
Закалка-старение	432	358	5,4
Закалка-раскатка по режиму I	349	264	12,3
То же и старение	449	430	14,3
Закалка-раскатка по режиму 5	456	386	8,3
То же и старение	491	469	7,8
Закалка-раскатка по режиму 6	436	394	12,5
То же и старение	499	446	1,5
Закалка-раскатка по режиму 7	471	433	4,5
То же и старение	486	463	7,7

Механические свойства соединений раскатанных обечаек после термомеханической обработки без разделения деформаций на предварительную и окончательную приведены в табл. 23. Установлено, что требуемая  $\sigma_{0.2} = 480$  МПа достигается при степени деформации, несколько большей, чем в случае с разделением деформации, но и здесь свойства шва выше, чем у основного металла.

Данные табл. 24 свидетельствуют о том, что в процессе наружной раскатки металла больших толщин (40...60 мм) термомеханическая обработка оказывает такое же влияние на свойства шва и основного металла, как и при раскатке тонкостенных оболочек.

Анализ микроструктуры позволил установить следующие основные закономерности.

Холодная деформация и последующая закалка приводят к образованию мелкозернистой рекристаллизованной структуры.

Холодная деформация после закалки вызывает обычные изменения структуры: границы зерен искривляются, зерна еще больше вытягиваются

Т а б л и ц а 24

Механические свойства шва и основного металла  
после наружной раскатки толстостенных обечаек

Цикл термической обработки	Шов			Основной металл		
	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %	$\sigma_b$ , МПа	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\delta$ , %
Продольные образцы						
Отжиг	150	115	11,9	151	105	10,8
Отжиг-раскатка по режиму 2	222	211	5,6	218	204	6,2
То же и закалка	320	221	13,2	344	196	20,8
Отжиг-раскатка по режиму 2, закалка-раскатка по режиму 3	402	356	7,0	391	351	5,65
То же и старение	475	427	6,2	472	419	6,1
Поперечные образцы						
Отжиг	157	125	15,7	154	116	14,9
Отжиг-раскатка по режиму 2	220	213	6,7	219	207	6,7
То же и закалка	342	195	20,3	345	200	23,0
Отжиг-раскатка по режиму 2, закалка-раскатка по режиму 3	393	344	9,85	409	356	10,5
То же и старение	479	425	8,8	474	427	8,6

в направлении раскатки, внутри них заметны полосы скольжения. Очевидно, что с ростом суммарной степени деформации структурные составляющие измельчаются.

Структура сварного шва характеризуется в 4...5 раз более мелким зерном по сравнению с основным металлом, и в этом заключается их основное различие. Имеет место также большая плотность и дисперсность избыточных фаз, что обусловлено высокими скоростями кристаллизации металла шва. Увеличение степени предварительной деформации перед закалкой приводит к уменьшению размеров рекристаллизованного зерна, образувшегося в результате последующей закалки, что обеспечивает более высокие механические свойства.

### 3.10. Взаимосвязь параметров процесса сварки и геометрии шва

Возможность предсказания геометрии шва при заданных режимах источника нагрева или выбора этих параметров для получения необходимой геометрии шва - одно из важнейших требований к теории сварочного процесса. Решение этой проблемы предполагает высокую степень изученности наиболее существенных физических явлений при сварке и достигается на основе сохранения энергии. Попытка расчета геометрии зоны проплавления предпринималась на всех этапах развития метода ЭЛС, однако полного решения проблемы еще нет.

В работе [4] проанализированы и систематизированы на ряде моделей различные подходы к нахождению взаимосвязи параметров процесса сварки и геометрии шва исходя из закона сохранения энергии:

$$\eta_e U_{\text{учк}} I_{\text{п}} \Delta t = J_{\text{св}} + J_{\text{т}},$$

где  $\Delta t$  - время прохождения электронным пучком со скоростью  $v$  расстояния, равного его диаметру;  $J_{\text{св}}$  - теплота, необходимая для нагрева, плавления и частичного испарения металла в зоне непосредственного воздействия пучка за время  $\Delta t$ ;  $J_{\text{т}}$  - теплота, уносимая за время  $\Delta t$  из зоны непосредственного воздействия пучка вследствие теплоотвода.

В работе [43] приведены результаты теоретических расчетов глубины проплавления металлов при ЭЛС, основанных на анализе теплового баланса процесса сварки. Существенное влияние на глубину проплавления оказывает величина ускоряющего напряжения, ток луча, скорость электронно-лучевой сварки и диаметр пятна луча на изделии, а также температура плавления свариваемого металла и прочие теплофизические характеристики. Выведена формула для определения глубины проплавления (в см) при электронно-лучевой сварке:

$$h = \frac{q - \psi^2 \xi \sigma_0 (T_L + 273,15)^4}{\frac{1}{2} \psi v [(C_p \rho T_L + H + \sigma H_v + 5\lambda T_s)] \left( \frac{1}{2a} + \frac{1}{v_s} \right)},$$

где  $h$  - глубина проплавления;  $q_0 = U_e J_e$  - эффективная тепловая мощность, кал;  $\psi$  - диаметр пятна нагрева, см;  $\xi$  - коэффициент черноты;  $\sigma_0 = 1,378 \cdot 10^{-12}$  кал·см<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>·град<sup>-4</sup> - постоянная Стеффана-

Больцмана;  $T_1$  - температура ванны металла,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $v$  - скорость электронно-лучевой сварки,  $\text{см}/\text{с}$ ;  $C_p$  - теплоемкость,  $\text{кал}^{-1}\cdot\text{град}^{-1}$ ;  $\rho$  - плотность металла,  $\text{г}\cdot\text{см}^{-3}$ ;  $H$  - удельная теплота плавления,  $\text{кал}\cdot\text{см}^{-3}$ ;

$\sigma$  - отношение испаряющейся массы металла к общей массе расплавленного металла;  $H_v$  - удельная теплота парообразования,  $\text{кал}\cdot\text{см}^{-3}$ ;  $T_2$  - температура плавления металла,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $U_0$  - ускоряющее напряжения,  $\text{кВ}$ ;  $J$  - ток луча,  $\text{мА}$ ;  $\eta$  - КПД, % ( $\eta = 0,98$ );  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности,  $\text{кал}\cdot\text{см}^{-1}\cdot\text{с}^{-1}$ ;  $\alpha$  - коэффициент температуропроводности,  $\text{см}^2\cdot\text{с}^{-1}$ .

Расчеты, проведенные по выведенной формуле, как утверждают авторы, хорошо согласуются с экспериментальными данными. Установлено, что потери тепла за счет испарения и излучения весьма незначительны. Только при очень большом диаметре пятна нагрева необходимо учитывать потери на радиацию.

В работе [44] получена формула для определения глубины проплавления методом анализа размерностей влияющих на нее параметров.

Известно, что глубина проплавления при сварке электронным лучом зависит от следующих параметров:

- качества подводимого тепла  $q$  (кал/о);
- диаметра пятна нагрева  $d_n$ , см;
- скорости сварки  $V$ , см/с;
- теплоемкости свариваемого металла  $C$ ,  $\text{кал}/\text{см}^3\cdot^{\circ}\text{C}$ ;
- коэффициента теплопроводности  $\lambda$ ,  $\text{кал}/\text{см}\cdot\text{с}\cdot^{\circ}\text{C}$ ;
- скрытой теплоты плавления  $\gamma$ ,  $\text{кал}/\text{см}^3$ ;
- температуры плавления  $T_{пл}$ ,  $^{\circ}\text{C}$ .

Количество теплоты, необходимое для плавления металла, можно определить по уравнению

$$q = (CT_{пл} + \gamma) \cdot$$

Чем больше скрытая теплота плавления, тем меньше глубина проплавления.

Энергия, затраченная на нагревание тела, определяется коэффициентом теплопроводности. Чем больше этот коэффициент, тем большее количество тепла уносится из зоны нагрева и, следовательно, меньше глубина проплавления.

Поэтому можно записать выражение для глубины проплавления (в см) в следующем виде:

$$h = K_1 q^a - \lambda^b C^e \gamma^d d_n^g v^m T^n,$$

где  $K_1, a, b, e, d, m, n$  — постоянные коэффициенты.

Отсюда получим шесть уравнений, связывающих показатели

$$a, b, e, d, g, m, n.$$

В результате решения этих уравнений найдены следующие значения показателей:

$$a=1, b=\frac{1}{3}, e=e, d=-\frac{2}{3}-e, g=-\frac{2}{3}, m=-\frac{2}{3}, n=-\frac{1}{3}+e.$$

Подставляя эти величины в выражение для глубины проплавления, получим

$$h = K_1 \frac{q}{(\lambda \gamma^2 d_n^2 v^2 T_{пл})^{2/3}} \left( C \frac{T_{пл}}{\gamma} \right)^e.$$

Из приведенного выражения необходимо определить две постоянные величины  $K_1$  и  $e$ , которые определяют экспериментальным путем.

Уравнение для определения глубины проплавления при сварке алюминия электронным лучом можно записать в следующем виде:

$$h = 9 \cdot 10^{-2} \frac{q}{(\lambda \gamma^2 d_n^2 v^2 T_{пл})^{2/3}} \left( C \frac{T_{пл}}{2} \right)^{0,38}.$$

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Николаев Г.А., Ольшанский Н.А. Специальные методы сварки: Учеб. пособие для студентов вузов. М.: Машиностроение, 1975, 232 с., ил.
2. Туревич С.М., Замков В.Н., Блащук В.Е. и др. Металлургия и технология сварки титана и его сплавов. Киев: Наукова думка, 1986. 240 с.
3. Чвертко А.И., Назаренко О.К., Святский В.Е. и др. Оборудование для электронно-лучевой сварки. Киев: Наукова думка, 1973. 408 с.
4. Назаренко О.К., Кайдалов А.А., Ковбасенко С.Н. и др. Электронно-лучевая сварка /Под ред. Б.Е.Патона. Киев: Наукова думка, 1987. 256 с.

5. Grawford C.K., *Elektron beam machining - Introduction to the electron beam welding*. 1962. № 4. p 345-353.

6. Назаренко О.К., Истомин Е.И., Покшин В.Е. Электронно-лучевая сварка. М., 1966. 128 с.

7. Бондарев А.А., Воропай Н.М. О силах, действующих на сварочную ванну при проплавлении алюминиевых сплавов электронным лучом // Физика и химия обработки материалов. 1974. № 2. С. 50-55.

8. Ольшанский Н.А., Гуткин А.М., Гирмаджи Г.Д. Перемещение расплавленного металла в процессе электронно-лучевой сварки // Сварочное производство. 1974. № 9. С. 12-14.

9. Родигин В.Н. О форме кратера, образующегося при электронно-лучевой сварке // Физика и химия обработки материалов. 1987. № 2. С. 11-16.

10. Бартенев В.А., Федоров В.В. Выливание жидкой фазы - новый механизм формирования кратера при плоском развитом испарении металлической мишени лазерным лучом. Письма в журн. ЭТФ. 1973. Вып. 7. М17. С. 348-351.

11. Веленев А.Н., Гладиш Г.Г., Явохин А.Н. О механизме поддержания лазерным лучом глубокого парового канала в жидкости // Прикладная механика и техническая физика. 1983. № 1. С. 8-51.

12. Поль Р.В. Оптика и атомная физика. М., 1966. 420 с.

13. Ольшанский Н.А. Перенос металла в кратере при электронно-лучевой сварке // Сварка электронным лучом: Материалы конференции. М.: 1974. С. 3-9.

14. Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Кокора А.Н. Лазерная обработка материалов. М., 1975. 296 с.

15. Кайдалов А.А., Башенко В.В. Гидродинамические процессы в расплаве при лучевых методах сварки // Автоматизация технологической подготовки сварочного производства / Под ред. В.А. Судника и др. Тула, 1986. С. 14-24.

16. Патон Б.Е., Назаренко О.К., Локшин В.Е. и др. Особенности электронно-лучевой сварки в различных пространственных положениях // Автоматическая сварка. 1972. № 6. С. 1-4.

17. Никифоров Г.Д. Металлургия сварки плавлением алюминиевых сплавов. М.: Машиностроение, 1972. 264 с.

18. Бондарев А.А. Состояние техники и преимущества процесса электронно-лучевой сварки конструкций из алюминиевых сплавов // Сварка алюминиевых сплавов криогенного и общего назначения: Материалы сов.-амер. семинара. Киев: Наукова думка, 1984. С. 10-19.



19. Бондарев А.А., Рабкин Д.М., Кузьменок О.С. Свариваемость сплава АМГб электронным лучом в различных пространственных положениях // Автоматическая сварка. 1976. № 12. С. 34-37.
20. Бондарев А.А., Третьяк Н.Г. Влияние параметров режима на размеры зоны проплавления и свойства соединений при сварке плит из сплава I20I электронным лучом // Актуальные проблемы сварки цветных металлов. Киев: Идукова думка, 1980. С. II4-II7.
21. Бондарев А.А., Третьяк Н.Г. Особенности сварки электронным лучом поковок сплава I20I толщиной до 250 мм и механические свойства. // Автоматическая сварка. 1981. № 4. С. 1-5.
22. Механические свойства соединений сплава OI420, выполненных электронно-лучевой и аргонно-дуговой сваркой / Д.М. Рабкин, А.А. Бондарев, В.В. Баранов и др. // Автоматическая сварка. 1976. № 7. С. 39-43.
23. Технология и оборудование сварки плавлением / Под ред. Г.Д. Никифорова. М.: Машиностроение, 1978. 327 с.
24. Воропай Н.М., Рабкин Д.Л., Фатеев Ю.Ф. и др. Химическое полирование поверхностей алюминия и его сплавов под сварку // Автоматическая сварка. 1971. № 12. С. 63-64.
25. Воропай Н.М., Рева А.А., Сотченко В.П. и др. Механизированная электрохимическая обработка поверхности сварочной проволоки из алюминиевых сплавов // Информ. письмо. 1980. № 24. (I215). АН УССР, ИЭС им. Е.О. Патона.
26. Бондарев А.А., Третьяк Н.Г. Свойства соединений листов и плит алюминиевого сплава I20I, сваренных электронным лучом // Автоматическая сварка. 1988. № 7. С. 49-51.
27. Бондарев А.А., Рабкин Д.М. Испарение легколетучих элементов при электронно-лучевой сварке алюминиевых сплавов // Автоматическая сварка. 1974. № 3. С. 13-16.
28. Пазухин В.А., Фишер А.Я. Разделение и радиирование металлов в вакууме. М.: Металлургия, 1969. 204 с.
29. *Matsuda F., Hachimoto T., Arata Y. Some metallurgical observations on electron beam welding // Trans. J. Weld. Soc. 1970. 1. N1. p. 75-85.*
30. Исследование механических свойств, структуры и деформаций соединений сплава OI420, выполненных электронно-лучевой сваркой // А.А. Бондарев, Л.М. Лабанов, В.К. Пивторак и др. // Автоматическая сварка. 1975. № 3. С. 14-17.

31. Рабкин Д.М., Воропай Н.М., Бондарев А.А. Особенности электроно-лучевой сварки алюминиевых сплавов //Автоматическая сварка. 1971. № 2. С. 48-52.
32. Бондарев А.А., Воропай Н.М. Поперечные деформации при электроно-лучевой сварке стыковых соединений сплава АМг6 //Автоматическая сварка. 1972. № 12. С. 31-33.
33. Бондарев А.А., Третьяк Н.Г. Поперечные укорочения и деформации при электроно-лучевой сварке сплава I20I //Автоматическая сварка. 1980. № 2. С. 41-43.
34. Бондарев А.А., Чернов В.Ю., Еланов И.М. и др. Деформации при электроно-лучевой сварке поршней из литейных алюминиевых сплавов //Автоматическая сварка. 1981. № 5. С. 16-19.
35. Бондарев А.А., Третьяк Н.Г., Антропов Н.П. Свойства сплава I20I и его сварных соединений, выполненных электронным лучом при двухосном растяжении при повторно-статических нагружениях в условиях низких температур //Материалы УП Всесоюз. конф. по электроно-лучевой сварке. (Киев, 8-11 дек. 1980). Киев: Наукова думка, 1981. С. 68-71.
36. Третьяк Н.Г., Бондарев А.А., Антропов Н.П. Механические свойства основного металла и сварных соединений алюминиевого сплава I20I, выполненного электроно-лучевой сваркой при низких температурах //Автоматическая сварка. 1980. № 8. С. 47-51.
37. Бондарев А.А. Сопротивление усталости алюминиевых сплавов АМг5, АМг6Н, I20I и их соединений, выполненных электроно-лучевой сваркой //Автоматическая сварка. 1981. № 6. С. 40-42.
38. Электроно-лучевая сварка разнофазных алюминиевых сплавов /А.А.Бондарев, В.Ю.Чернов, А.В.Лозовский и др.//Автоматическая сварка. 1983. № 10. С. 18-25.
39. Бондарев А.А. Методы предупреждения и способ исправления дефектов, возникающих при ЭЛС алюминиевых сплавов //Информ.материалы СВВ. 1982. Вып. 1. С. 7-16.
40. Бондарев А.А., Воропай Н.М., Ищенко А.Я. и др. Влияние технологических факторов на плотность алюминиевых сплавов, выполненных электроно-лучевой сваркой //Автоматическая сварка. 1972. № 8. С.24-26.
41. Зубриенко Г.Л., Тененбаум Ф.В., Петрованов В.М. и др. Электроно-лучевая сварка крупногабаритных узлов из алюминиевых сплавов в камерах местного вакуумирования //Актуальные проблемы сварки цветных металлов: Киев: Наукова думка, 1980. С.111-113.

42. Дударь Л.А. Особенности изготовления сварных узлов летательных аппаратов из термоупрочняемых алюминиевых сплавов: Конспект лекций. Куйбышев. авиац. ин-т. Куйбышев, 1989. 47 с.

43. Электронно-лучевая сварка и последующая термомеханическая обработка обечаек большого диаметра из сплава I201 /Б.Е.Патон, О.К. Назаренко, А.А.Бондарев и др. //Автоматическая сварка, 1983. № 9. С.1-5.

44. *Koch Fritz, Neubert Gunter. Eindringtiefe beim Elektronenstrahl schweissen Zis-Mitt, №12. 1967, s.1625-1633.*

45. Ольшанский Н.А., Гирмалки Г.Д. Определение глубины проплавления при электронно-лучевой сварке //Сварочное производство. 1972. № 8. С. II-13.

Д у д а р ь Леонид Арсеньевич  
Н а у м о в Лев Александрович

ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ  
АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ  
В ПРОИЗВОДСТВЕ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Редактор Т.К.К р е т и н и н а  
Техн.редактор Г.А.У с а ч е в а  
Корректор Н.С.К у п р и я н о в а

Лицензия ЛР № 020301 от 28.11.91.

Подписано в печать 14.02.95

Формат 60x84<sup>I</sup>/16

Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл.печ.л. 4,4. Усл.кр.-отт. 4,5. Уч.-изд.л. 4,3.

Тираж 150 экз. Заказ 80. Арт.С-2/95.

Самарский государственный аэрокосмический  
университет имени академика С.П.Королева.  
443066 Самара, Московское шоссе, 34.

Издательство Самарского аэрокосмического университета.  
443 001 Самара, ул. Ульяновская, 18.