

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)

Ю.А. ВАШУКОВ

ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ ЛЕГКИХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Рекомендовано редакционно-издательским советом федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева» в качестве учебного пособия для обучающихся по основным образовательным программам высшего образования по направлениям подготовки 24.03.04 Авиационное строительство, 27.03.02 Управление качеством, 15.03.05 Инженерное обеспечение машиностроительных производств и по специальностям 24.05.01 Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов, 24.05.07 Самолето- и вертолетостроение

САМАРА
Издательство Самарского университета
2022

УДК 621.791(075)

ББК 34.641я7

В234

Рецензенты: д-р техн. наук, проф. С. В. Коновалов,
зам. техн. директора АО «Металлист-Самара»
В. В. Рыбаков

Вашуков, Юрий Александрович

В234 Особенности сварки легких конструкционных материалов:
учебное пособие / *Ю.А. Вашуков*. – Самара: Издательство Самарского
университета, 2022. – 80 с.: ил.

ISBN 978-5-7883-1730-4

Учебное пособие составлено в соответствии с рабочими программами курсов, связанных со сварочными процессами в производстве летательных аппаратов, для обучающихся института авиационной и ракетно-космической техники Самарского университета.

В работе изложены общие сведения, особенности сварки металлов, используемых в производстве аэрокосмических конструкций. Даны практические рекомендации по разработке технологического процесса производства сварных конструкций и оценке их технологичности.

Предназначено для обучающихся по направлениям подготовки 24.03.04 Авиастроение, 24.05.07 Самолето- и вертолетостроение, 24.05.01 Проектирование, производство и эксплуатация ракет и ракетно-космических комплексов, 27.03.02 Управление качеством, 15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств.

Учебное пособие может быть полезно молодым специалистам авиационной и ракетно-космической отраслей.

Подготовлено на кафедре производства летательных аппаратов и управления качеством в машиностроении Самарского университета.

УДК 621.791(075)

ББК 34.641я7

ISBN 978-5-7883-1730-4

© Самарский университет, 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 СВАРКА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ	5
1.1 Свариваемость алюминиевых сплавов.....	5
1.2 Технологичность сварных конструкций из алюминиевых сплавов.....	9
1.3 Технология сварки алюминиевых сплавов	13
2 СВАРКА ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ	31
2.1 Особенности сварки титана и его сплавов.....	31
2.2 Технологические процессы сварки титановых сплавов	44
3 СВАРКА МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ	57
3.1 Физико-химические свойства магния и его сплавов.....	57
3.2 Особенности сварки магния и его сплавов	58
3.3 Технология сварки магниевых сплавов	61
4 ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ	67
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	79

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время производство авиационной техники немислимо без использования различных технологий сварки. Сборка-сварка в общей трудоемкости изготовления аэрокосмической техники составляет 40-50%. Но большие габариты и сложность конструкций, необходимость получения соединений металлических и неметаллических материалов, а также сварка таких материалов как титановые, алюминиевые и магниевые сплавы, обладающих специфическими механическими и физическими свойствами, сильно усложняет процесс.

Достигнутые успехи в области автоматизации и механизации сварочных процессов позволили коренным образом изменить технологию изготовления объектов аэрокосмической техники. Достигнуты значительные успехи в разработке прогрессивных методов сварки, создании высокоэкономичных сварных конструкций из легких конструкционных материалов.

Постоянное конструктивное совершенствование объектов аэрокосмической техники выдвигает жесткие требования к технологическому процессу их производства. При подготовке производства к выпуску новых конструкций ставятся требования максимального сокращения сроков и снижения стоимости подготовки производства. В связи с этим возникают задачи разработки более совершенной технологии сварки широко применяемых легких конструкционных материалов, что требует или модернизации существующего оборудования и технологии, или разработки новых более совершенных методов сварки.

1 СВАРКА АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

1.1 Свариваемость алюминиевых сплавов

В сварных конструкциях используют чистый алюминий и его сплавы: АМц – алюминиево-марганцевый, АМг – алюминиево-магниевый, Д – алюминиево-магниево-медный (дюраль), АК – алюминиево-кремнистый, В95 – алюминиево-магниево-цинковый.

Сварка алюминия и его сплавов принципиально отлична от сварки стали. Это связано с его особенностями:

- высокая теплопроводность. Она в пять раз выше, чем у сталей, а потому и тепло активно отводится от свариваемого места. В связи с этим требуется обеспечение высоких вложений тепла;

- высокая степень сродства к кислороду и образование прочного оксида алюминия (Al_2O_3) в виде пленки, покрывающей поверхность металла и имеющей значительное превышение температуры плавления ($2050^\circ C$) над температурой плавления алюминия ($\sim 660^\circ C$). Обладая высокой температурой плавления, оксидная пленка не расплавляется в процессе сварки и покрывает металл прочной оболочкой, затрудняющей образование общей ванны. Это сказывается на характере капельного переноса металла. При сварке в окислительной среде размер капель, переходящих с электрода, достигает большой величины, и горение дуги протекает неустойчиво;

- большая жидкотекучесть расплавленного металла затрудняет управление сварочной ванной. Очень мало времени необходимо для застывания сварочной ванны, что приводит к неполному газовыделению, образованию пор в шве, плохому соединению;

- алюминий при нагреве не изменяет цвет, т.е. сварщик не получает визуальную информацию о достигнутой температуре;

- высокая литейная усадка, которая приводит при затвердевании материала сварочной ванны к развитию внутренних напряжений. Следствием напряжений становится появление дефектов, включая горячие трещины;

- высокий коэффициент линейного расширения приводит к существенным остаточным деформациям;

- способность алюминия растворять водород, который при определенных условиях способен образовывать поры в металле швов. Основным источником водорода, растворяющегося в сварочной ванне, является реакция взаимодействия влаги, содержащейся в окисной пленке с металлом. При охлаждении растворенный водород в связи с понижением растворимости стремится выделиться из металла. Пузырьки выделяющегося водорода, не успевая всплыть из ванны, остаются в шве, образуя поры. Предупреждению пористости при сварке алюминия может способствовать:

А) уменьшения доли участия присадочной проволоки в образовании шва за счет увеличения ее диаметра;

Б) рациональная обработка поверхности проволоки и основного металла;

В) ужесточение режимов сварки;

Г) предварительный подогрев изделия (или зоны расположения швов) до температуры 250-400°C.

Для осуществления сварки должны быть приняты меры по разрушению и удалению пленки и защите металла от повторного окисления. С этой целью используют:

А) специальные сварочные флюсы. Действие флюсов для сварки алюминия основано на процессах растворения и смывания окисной пленки расплавленным флюсом;

Б) сварку осуществляют в атмосфере инертных защитных газов;

В) в условиях электродуговой сварки в инертных защитных газах удаление окисной пленки производят в результате электрических процессов, происходящих у катода (катодное распыление);

Г) для предупреждения дополнительного окисления и засорения ванны окислами используют защитный газ высокой чистоты.

При сварке термоупрочняемых сплавов металл в зоне термического влияния (ЗТВ) разупрочняется (прочность сварного соединения не более 60-70% от прочности основного металла). Поэтому сварка сплавов этой группы нецелесообразна, за исключением случаев, когда возможна последующая термообработка соединения.

Возможность использования алюминиевых сплавов в сварных аэрокосмических конструкциях ответственного назначения определяется в первую очередь их свариваемостью. При сварке плавлением свариваемость зависит от комплекса факторов: это реакция металла на термомодеформационный цикл сварки, способ и режим сварки, характеристики присадочного материала, степень защиты зоны сварки, применение флюсов, конструктивные особенности свариваемого изделия и условия его эксплуатации, принятый технологический процесс изготовления изделия и др. Часто свариваемость оценивается сопоставлением свойств сварных соединений с аналогичными свойствами основного металла. Принято учитывать также склонность материала к образованию дефектов при сварке (трещин, пор, оксидных плен и др.), свойства при статических, повторно-статических, высокочастотных и ударных нагрузках, коррозионную стойкость с учетом условий эксплуатации изделий.

В таблице 1.1 приведена оценка свариваемости сплавов при сварке плавлением (дуговая сварка неплавящимся электродом в среде инертных газов) и контактной сварке (точечная и роликовая). Там же представлены рекомендации по выбору сварочной проволоки при сварке, прихватке и подварке сплавов.

Таблица 1.1. Свариваемость алюминиевых сплавов

Марка сплавов	Свариваемость без присадки	Свариваемость с присадкой	Марка сплавов	Свариваемость без присадки	Свариваемость с присадкой
АД1	св	св	АВ	нс	нс
АМц	св	св	В92ц	св	св
АМГ1	св	св	1915	нс	нс
АМГ2	нс	нс	ВАД1	св	св
АМГ3	св	св	Д1	нс	нс
АМГ4	св	св	Д16	нс	нс
АМГ5	св	св	Д19	нс	нс
АМГ6	св	св	В95	нс	нс
Д20	св	св	В96	нс	нс
1201	св	св	АК6	нс	нс
1205	нс	нс	АК8	нс	нс
АД31	нс	нс	АК4	нс	нс
АД33	нс	нс	АК4-1	нс	нс
АД35	нс	нс			

Примечание: «св» – сплав свариваемый; «нс» – трудносвариваемый

Важнейшим показателем свариваемости алюминиевых сплавов является способность не образовывать при сварке «горячих трещин». Сплавы, крайне чувствительные к горячему трещинообразованию, считаются не свариваемыми. Применение их в сварных конструкциях не рекомендуется. Сплавы, не упрочняемые термической обработкой (группы АМг и АМц, технический алюминий), имеют

низкий уровень легирования. Воздействие термического цикла сварки не вызывает разупрочнения металла в ЗТВ. Механическая их прочность относительно невысока, но они хорошо свариваются и являются коррозионностойкими.

Сплавы, упрочняемые термической обработкой (закалка с последующим старением), имеют обычно более высокую степень легирования. При их сварке металл в ЗТВ разупрочняется (прочность сварного соединения не более 60...70% от прочности основного металла). Поэтому сварка сплавов этой группы нецелесообразна, за исключением случаев, когда возможна последующая термообработка соединения.

1.2 Технологичность сварных конструкций из алюминиевых сплавов

В конструкциях из алюминиевых сплавов предпочтение отдают стыковым соединениям. Одностороннюю сварку стыковых соединений с полным проплавлением выполняют на подкладках. Там, где возможно, используют удаляемые подкладки из нержавеющей стали, меди и других металлов с более высокой температурой плавления, а в труднодоступных местах применяют остающиеся подкладки, которые изготавливают из свариваемого алюминиевого сплава. Чтобы удержать расплавленный металл сварочной ванны, подкладка должна плотно прилегать к нижней поверхности свариваемых кромок. Зазор между ними обычно не превышает 0,5-1,0 мм. Для стабильного и полного удаления оксидных пленок из корня стыковых соединений в подкладке выполняют канавку, которую располагают под состыкованными кромками. Канавка препятствует переходу тепла из свариваемых кромок в подкладку и позволяет оксидным пленкам корня шва опуститься вместе с расплавленным металлом сварочной ванны в нижнюю выпуклость шва. Процесс уда-

ления оксидных пленок при односторонней сварке стыковых соединений на подкладке с канавкой иллюстрирует рис. 1.1.

Глубина канавки задается такой, чтобы при правильно выбранном режиме сварки она в 1,5 раза превышала толщину не удаляемых дугой оксидных пленок. Для металла толщиной 1,0-20 мм обычно применяют подкладки с глубиной канавки 0,5-2,0 мм соответственно.

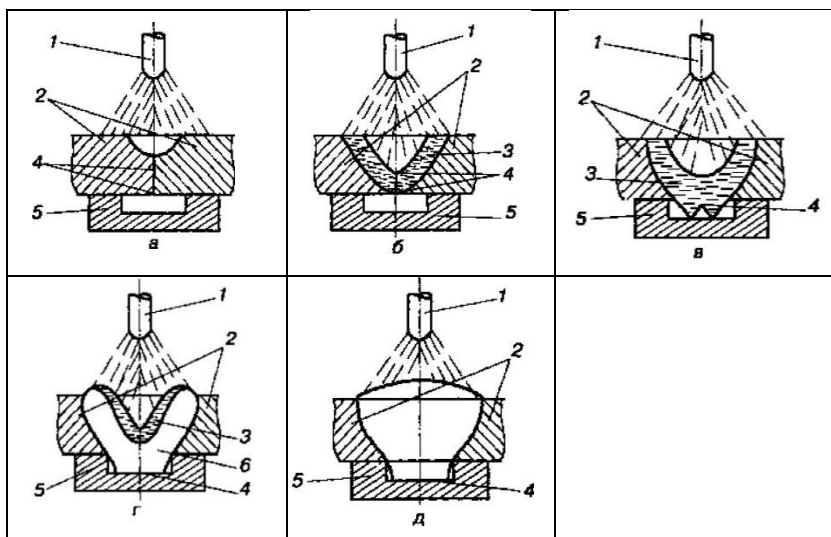


Рис. 1.1. Схема удаления оксидных плен из корня шва при односторонней сварке стыковых соединений на подкладке с канавкой:

- 1 – электрод; 2 – свариваемый металл; 3 – расплавленный металл;
- 4 – поверхностные оксидные пленки; 5 – подкладка с канавкой;
- б – металл шва; а-д – последовательность удаления

Под действием деформаций в процессе сварки стык в большей или меньшей степени смещается относительно оси канавки. Чтобы обеспечить в этих условиях свободный прогиб расположенных снизу соединений оксидных пленок, канавка должна иметь достаточную ширину.

В зависимости от толщины свариваемых кромок, способа и условий сварки ширина канавки в подкладке принимается равной 0,7-0,9 ширины верхней выпуклости шва, но не менее 5-6 мм.

Наиболее часто используют канавки прямоугольного сечения (рис.1.2, а), которые обеспечивают стабильное формирование шва и удаление оксидных плен из корня шва при значительных смещениях сварочной дуги и линии стыка относительно оси канавки.

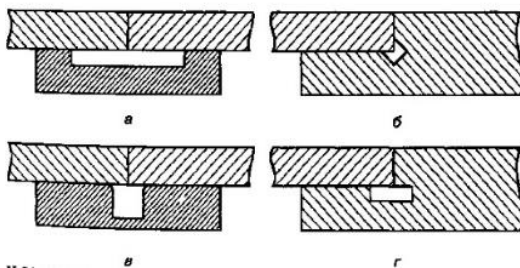


Рис. 1.2. Форма поперечного сечения канавок в подкладке для удаления оксидных пленок с нижней поверхности соединяемых кромок:

- а – прямоугольная; б – квадратная наклонная;
- в – квадратная с скругленными краями;
- г – прямоугольная, образованная прессованием

Хорошая оснастка, обеспечивающая удержание состыкованных кромок по оси канавки, и соответствующие режимы сварки позволяют эффективно удалять оксидные пленки при использовании канавки, поперечное сечение которой показано на рис. 1.2, в.

Чтобы уменьшить количество наплавляемого металла, разделку свариваемых кромок выполняют с притуплением, высота которого определяется проплавляющей способностью дуги. Например, при автоматической сварке плавящимся электродом высота притупления составляет 4-5 мм, в случае механизированной сварки плавящимся электродом высота притупления уменьшается до 1,5-2,0 мм, а при ручной сварке вольфрамовым электродом используют кромки, скошенные без притупления. Погруженная в разделку дуга

не может удалить оксидную пленку со всей поверхности разделки, поэтому ее заполняют в несколько проходов.

В стыковых соединениях с остающейся подкладкой, которая составляет единое целое со свариваемым элементом, используют более простые по исполнению наклонные и прямоугольные сечения канавок (рис.1.2, б, в). В таких соединениях канавки служат не только для удаления оксидных пленок, но и для уменьшения отвода тепла от сварочной ванны в сторону более массивного элемента соединения.

Примером сварки с остающейся подкладкой может служить двусторонняя сварка стыковых соединений без разделки кромок. В таких соединениях при выполнении первого прохода подкладкой служит нерасплавленный металл, а при выполнении корня шва на обратной стороне соединения в качестве подкладки выступает металл первого слоя. При сварке угловых швов дуга отклоняется от оси электрода к ближайшей из стенок так как расстояние до нее всегда меньше расстояния между концом электрода и вершиной образованного стенками угла. Это может стать причиной непровара между стенкой и полкой.

Следует ограничивать применение в ответственных изделиях угловых, тавровых и нахлестанных соединений. В связи с трудностью определения глубины проплавления неразрушающими методами контроля невозможно оценить работоспособность таких соединений в сварной конструкции. Так, их прочность составляет 0,4-0,6 прочности стыкового соединения и зависит от условий формирования наплавленного металла (глубина провара, форма перехода от наплавленного металла к основному и т.д.).

При выполнении соединения в отбортовку на сплавах АМг5, АМг6, Д20 часто в районе изгиба наблюдаются микронадрывы, которые являются очагом образования трещины при сварке.

1.3 Технология сварки алюминиевых сплавов

Независимо от применяемого способа, сварка конструкционных элементов из алюминия и алюминиевых сплавов проводится только после тщательной очистки – подготовки свариваемых кромок, которая является залогом высоких результатов сварки. Для этого необходимо непосредственно перед началом процесса провести:

- очистку от грязи и обезжиривание всех свариваемых деталей и присадочного материала с помощью любого подходящего растворителя;
- при необходимости выполнить разделку или отбортовку кромок;
- удаление Al_2O_3 механическим или химическим методом;
- удаление влаги с помощью легкого предварительного прогрева;
- предварительный прогрев массивных деталей для снижения вероятности образования горячих трещин.

Сварка алюминия и алюминиевых сплавов проводится несколькими способами. Ее ведут с применением специализированного оборудования и сварочных материалов. Зона сварки защищается инертными газами или флюсами. Среди способов выделяются: сварка неплавящимся электродом и сварка плавящимся электродом в среде инертных газов и газовых смесях.

Сварка неплавящимся электродом. В большинстве случаев сварка производится вольфрамовым электродом диаметром от 2 до 6 мм. Вольфрамовые электроды могут быть иттрированными или лантанированными. Добавки оксидов редкоземельных металлов резко уменьшают количество теплоты, выделяющейся на электродах. В результате стойкость вольфрамовых электродов при сварке на переменном и постоянном токе повышается. Наиболее стойкими

при сварке являются иттрированные электроды, допускающие максимальную токовую нагрузку.

Для защиты расплавленного металла сварочной ванны и проволоки при сварке алюминия и его сплавов применяют инертные газы – аргон высшего или первого сорта по ГОСТ 10157-79 и гелий особой или высокой чистоты и их смеси.

Ручную аргонодуговую сварку вольфрамовым электродом ведут на переменном токе при расходе аргона 6-15 дм³/мин. Сварку можно выполнять не только в аргоне, но и в гелии при расходе гелия в 1,8-2,2 раза выше, чем аргона. Напряжение дуги при сварке в аргоне 15-20 В, при сварке в гелии 25-30 В. Сила тока зависит от толщины металла и диаметра электрода и выбирается в пределах 50-360 А при сварке в аргоне и 30-300 А при сварке в гелии.

При толщине листов до 3 мм сварку можно вести за один проход на подкладках, которые одновременно служат и для защиты обратной стороны шва. С этой точки зрения нахлесточные, угловые и тавровые соединения менее технологичны.

Металл толщиной 4-6 мм можно сваривать без скоса кромок за два прохода с двух сторон. При толщине металла свыше 6 мм необходима V-образная разделка и увеличение числа проходов. Возможна также X-образная разделка кромок.

При сварке стыковых соединений применяют присадочную проволоку диаметром 1-5 мм. Соединение с отбортовкой кромок целесообразно для металла толщиной 0,8-2 мм.

При выполнении швов вручную неплавящимся электродом особые требования предъявляются к технике сварки. Угол между присадочной проволокой и электродом должен составлять около 90°. Присадка подается короткими возвратно-поступательными движениями. Недопустимы поперечные колебания вольфрамового электрода. Длина дуги обычно не превышает 1,5-2,5 мм, расстояние от выступающего конца вольфрамового электрода до нижнего среза

наконечника горелки при стыковых соединениях – 1-1,5 мм, при тавровых (угловых) – 4-8 мм. Для уменьшения опасности окисления размеры сварочной ванны должны быть минимальными.

Основным преимуществом процесса дуговой сварки вольфрамовым электродом в среде защитного газа является отсутствие шлаковых включений, возможность работы на малых токах дуги (от 10 А), возможность сварки тонких листов, включая фольгу, высокая устойчивость горения дуги во всем диапазоне токов, технологичность процесса. Для осуществления сварки наиболее широко применяются стандартные аргонодуговые установки с возможностью использования переменного тока. В России такие установки носят общее название УДГУ (УДГ-180, УДГУ-251АС/ОС, УДГУ-351АС/ОС, УДГУ-501АС/БС).

В качестве аргонодуговых горелок используют горелки фирмы «Агни» (г. Северодвинск), горелки завода «Электрик» (г. Санкт-Петербург). Среди западных горелок наиболее распространены горелки фирмы Abicor Binzel (Германия). Как правило, для токов до 250 А выпускаются горелки с газовым охлаждением, а свыше 250 А – с водяным.

Питание дуги осуществляется переменным током от источников с падающими внешними характеристиками. Переменный ток дуги при сварке алюминиевых сплавов обеспечивает разрушение окисной пленки. Для повышения стабильности горения электрической дуги и эффективного разрушения окисной пленки вместе с падающей внешней характеристикой источника и постоянной работой осциллятора используют дополнительную индуктивность (дрессель) в цепи дуги, которая не позволяет погаснуть электрической дуге за счет ЭДС самоиндукции. Для повышения стабильности горения электрической дуги рекомендуется затачивать конец вольфрамового электрода. Симметричность тока обеспечивает равную проплавливающую и очищающую способность электрической дуги.

Максимальный сварочный ток выбирают в зависимости от диаметра вольфрамового электрода по эмпирической формуле

$$I = (60 \dots 65)d, \text{ A}$$

По сравнению с аргонодуговой сваркой симметричным током с использованием неплавящегося электрода, сварка алюминиевых сплавов асимметричным током расширяет технологические возможности за счет регулирования параметров тока прямой и обратной полярности. Как правило, регулировка асимметричности осуществляется в пределах 30% от амплитудного значения параметра. Преобладание составляющей тока прямой полярности приводит к увеличению глубины проплавления и скорости сварки, а также к повышению стойкости вольфрамового электрода. Преобладание тока обратной полярности улучшает очистку свариваемого металла от окисной пленки и повышает качество формирования шва. Выбор правильного режима сварки в этом случае является задачей технолога.

Для аргонодуговой сварки алюминиевых сплавов неплавящимся вольфрамовым электродом с применением переменного асимметричного тока используются установки УДГУ-351АС/ВС и УДГУ-501 АС/DC.

В ряде случаев целесообразно использовать сварку вольфрамовым электродом импульсной дугой. Подача импульсов осуществляется, как правило, с частотой свыше 100 Гц, и эти импульсы накладываются на базовое напряжение на дуге. Импульсы имеют остроугольную или прямоугольную форму и служат для оптимального формирования сварного шва и эффективного удаления окисной пленки. Наиболее часто такие импульсы применяются при сварке тонколистового металла. Для сварки в импульсном режиме выпускаются приставки к установкам УДГУ-351АОЮС и УДГУ-

501АС/ОС. Пульт пульсирующей сварки ППС-01 позволяет регулировать максимальное и минимальное значения импульсов тока, а также их продолжительность. В стандартном исполнении он позволяет регулировать частоту следования импульсов от 10 до 30 Гц. Это обеспечивает снижение вероятности прожогов свариваемого металла и улучшает формирование сварного соединения.

Аргонодуговая сварка на повышенной частоте обеспечивает высокую эффективность разрушения окисной пленки. В совокупности с наложением дополнительных импульсов это обеспечивает улучшение формирования сварного шва.

Для обеспечения эффективной газовой защиты для каждого режима сварки устанавливают оптимальный расход газа. Надежность защиты в процессе сварки определяется также диаметром и формой сопла горелки, расстоянием сопла от поверхности свариваемого изделия, отсутствием сквозняков. В таблице 1.2 даны рекомендуемые диаметры сопла горелки в зависимости от диаметра электрода.

Таблица 1.2. Определение диаметра выходного отверстия сопла

Диаметр вольфрамового электрода, мм	2-3	4	5	6
Диаметр выходного отверстия сопла, мм	10-12	12-16	14-18	16-22

Чрезмерный расход газа приводит к его турбулентному истечению и засасыванию в зону дуги воздуха, т.е. к нарушению газовой защиты. При малом истечении газа или чрезмерно большой скорости сварки защита зоны сварки будет недостаточной. Давление аргона в зависимости от расхода устанавливается в пределах 0,01-0,05 МПа. Аргон подают за 3-5 с до возбуждения дуги, а выключают через 5-7 с. после обрыва дуги. При сварке легких сплавов особенно

вредной является примесь влаги в аргоне, которую удаляют тщательной осушкой как газа, так и баллонов перед наполнением их аргоном.

Для повышения производительности сварки вольфрамовым электродом может использоваться трехфазная дуга. Более мощный источник нагрева позволяет за один проход на подкладке сваривать алюминиевые сплавы толщиной до 30 мм.

В качестве присадочного материала, выпускаемого по ГОСТ 7871-75, чаще всего используют проволоку:

- чистый технический алюминий (СвА99, СвА97, СвА85Т, СвА5);

- сплав алюминий-марганец (СвАМц);

- сплав алюминия с магнием (СвАМг3, СвАМг5, Св1557, СвАМг6, СвАМг63, СвАМг61);

- сплав алюминия с кремнием (СвАК5, СвАК10);

- сплав алюминия с медью (Св1201).

Диаметр присадочных проволок 2-5 мм.

Обычными критериями при выборе присадочного материала являются стойкость металла шва против образования трещин, прочность, пластичность, сопротивление коррозии, цветовая однородность после анодирования и стойкость при высоких температурах.

При дуговой сварке большинства соединений требуется проволока, которая обеспечивает формирование шва в соответствии с размерами, установленными ГОСТ 14806-80. Кроме того, применение различных проволок позволяет изменять состав шва, что особенно важно при сварке алюминиевых сплавов, у которых при одинаковом химическом составе прочностные, коррозионные и многие другие свойства литого металла шва хуже, чем у соединяемых листов, пресс-профилей и других полуфабрикатов, подвергнутых термической или механической обработке.


Требуемый для легирования шва состав проволоки выбирают с учетом химического состава свариваемого сплава и доли участия проволоки в образовании шва. Для дуговой сварки в инертных газах содержание каждого элемента в проволоке можно рассчитать из уравнения

$$C_{п} = \frac{C_{ш}}{(\gamma_{п} \times k_{у})} - \frac{C_{о}}{\gamma_{п}} + C_{о},$$

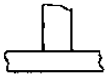
где $C_{п}$ – расчетное содержание элемента в проволоке; $C_{ш}$ – содержание элемента в металле шва; $\gamma_{п}$ – доля проволоки в металле шва; $k_{у}$ – суммарный коэффициент усвоения элемента металлом шва при сварке; $C_{о}$ – содержание элемента в свариваемом металле.

Доля проволоки в металле шва зависит от типа соединения, толщины свариваемых кромок, формы и размеров шва, зазоров и превышений (табл. 1.3).

Таблица 1.3. Среднее значение доли металла проволоки в металле шва

Тип соединения	Толщина металла, мм	Доля проволоки в шве
	2	0,5
	8	0,3
	18	0,2
	30	0,1
	9	0,5
	30	0,6
	60	0,7
	40	0,7
	60	0,8
	40	0,4
	60	0,4
	70	0,5

Окончание табл. 1.3.

	2	0,5
	8	0,6
	20	0,7

Согласно размерам шва, регламентированым ГОСТ 14806-80, доля проволоки в стыковых соединениях без разделки кромок уменьшается с увеличением толщины кромок, а в стыковых соединениях с разделкой кромок для сварки металла большей толщины требуется большее количество проволоки. В угловых и тавровых соединениях доля проволоки увеличивается по мере увеличения катетов шва.

Сложность соотношений, существующих между составом и свойствами металла шва, не позволяет получать соединения, которые одновременно имели бы максимальные значения всех технологических и эксплуатационных характеристик. Поэтому в зависимости от предъявляемых к соединениям требований для сварки каждого из алюминиевых сплавов обычно применяют несколько марок проволок. Одна из этих проволок – универсальная – обеспечивает соединениям достаточно высокие значения всех основных характеристик: стойкости против горячих трещин, прочности, пластичности и коррозионной стойкости. Остальные рекомендованные проволоки обеспечивают соединениям повышенные на 5-10% значения одной из названных характеристик при удовлетворительных значениях всех остальных (табл. 1.4). Предлагаемые в таблице марки проволок выбраны с учетом того, что при сварке доля их металла в металле шва составит 30-40%. При сварке соединений с другим соотношением металла проволоки и шва необходимого содержания легирующих элементов в шве достигают, соответственно изменяя форму и размеры соединяемых кромок.

Таблица 1.4. Проволоки для сварки алюминия и его сплавов

Свариваемый металл	Универсальные проволоки, обеспечивающие удовлетворительные характеристики соединения	Проволоки, обеспечивающие удовлетворительные основные характеристики соединения и повышенные показатели			
		стойкости против горячих трещин	временного сопротивления	относительного удлинения	коррозионной стойкости
А99; А97; А95	А99	А99	СвА85Т	А99	А99
А85; А8; АД00	СвА85Т	СвА85Т	1437	СвА97	1437
АД0; АД1	СвА5	СвА5	СвА5	СвА97	СвА85Т
АМцС	СвАМц	СвАМц	СвАМц	СвАМц	СвАМц
АМг3	СвАМг3	СвАМг5	СвАМг5	АВч	АВч
АМг5	СвАМг5	СвАМг63	СвАМг6	СвАМг5	Св1557
АМг6	СвАМг6	СвАМг63	СвАМг61	СвАМг63	Св1557
АМг61	СвАМг61	СвАМг63	СвАМг61	СвАМг63	СвАМг5
АВ; АД31; АД33	СвАК5	СвАК5	Св1557	Св1557	АВч0
1915	Св1557	СвАМг5	СвАМг6	СвАМг5	Св1557
1201	Св1201	Св1201	Св1201	Св1201	Св1201

Примечания: 1. Проволоку с обозначением «Св» поставляют по ГОСТ 7871-75, остальную по ТУ; 2. Проволока марок А99, 1437 и СвА85Т обеспечивает коррозионную стойкость соединений алюминия в азотной кислоте, а проволока марок, рекомендуемых для других деформируемых сплавов, гарантирует повышенную стойкость шва в атмосферных условиях.

Общим правилом при сварке алюминиевых сплавов является то, что металл сварочной проволоки должен примерно соответствовать по химическому составу металлу детали. Исключением явля-

ются сплавы алюминия с магнием, для сварки которых (из-за интенсивного испарения магния) следует использовать проволоку с содержанием магния большим, чем в детали с целью снижения температуры плавления присадочного материала и повышения временного сопротивления наплавленного металла.

Для сварки термообрабатываемых и разнородных алюминиевых сплавов используют алюминиевую проволоку Св-АК5, содержащую до 5% кремния.

Алюминиевая проволока считается довольно сложным материалом. Это касается как ее использования, так и хранения. Если герметичная упаковка вскрывается, рекомендуется использовать проволоку своевременно, поскольку после вскрытия начинается быстрое окисление материала с образованием слоя Al_2O_3 . Температура его плавления в разы выше, что затрудняет сварку. Хранение во вскрытой упаковке – это гарантия снижения качества проволоки. Ухудшение прогрессирует, если проволока оказывается во влажной среде.

Аргонодуговая сварка плавящимся электродом может выполняться в полуавтоматическом или автоматическом режимах. Преимуществом такого процесса является его высокая производительность.

Сварка выполняется проволокой диаметром 1,5-2,5 мм на постоянном токе обратной полярности. Скорость сварки зависит от сечения шва и может достигать 40 м/ч. Проволока подается со скоростью до 400 м/ч. В качестве защитной среды используют как чистый аргон, так и смесь аргона с гелием (до 70% гелия). С применением смеси возрастают глубина и ширина провара, что позволяет за один проход на подкладке выполнять сварку металла толщиной до 16 мм, а за два прохода – до 30 мм.

Для качественного формирования шва необходим правильный выбор параметров режима сварки. Представление об этом дает график, приведенный на рис. 1.3.

Полуавтоматическая сварка плавящимся электродом осуществляется при постоянном токе обратной полярности. При этом в результате катодного распыления происходит разрушение тугоплавкой оксидной пленки на поверхности металла. Однако, следует помнить, что такому разрушению подвергается лишь тонкий оксидный слой.

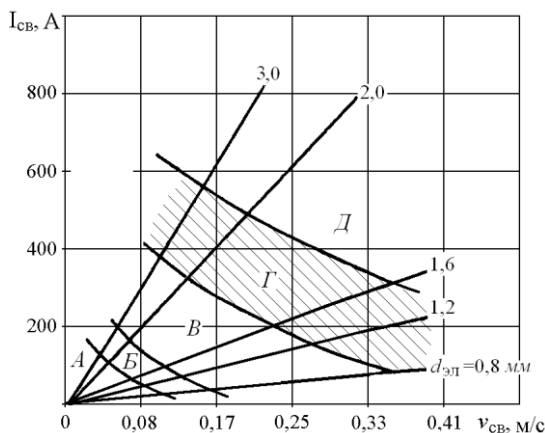


Рис. 1.3. К выбору параметров режима сварки алюминиевых сплавов плавящимся электродом в среде инертных газов:
 А – область коротких замыканий; Б – область сварки короткой дугой;
 В – область крупнокапельного переноса;
 Г – область струйного переноса (наиболее предпочтительна);
 Д – неустойчивый процесс со значительным разбрызгиванием

Более грубые образования, перед тем как проводить сварку, необходимо удалять механическим способом или методом травления. Сварка может осуществляться в различных пространственных положениях.

Недостатком способа сварки алюминиевых сплавов, плавящимся электродом является некоторое снижение показателей механических свойств по сравнению со сваркой неплавящимся электродом. Кроме того, хуже происходит удаление окисной пленки, поскольку при аргонодуговой механизированной сварке постоянным током сварочный процесс сопровождается короткими замыканиями, в момент которых катодное распыление отсутствует. Для устранения этих недостатков в сварочной установке ВД-306ДК применено новое техническое решение: низковольтная постоянная подпитка сварочной дуги напряжением 10-11 В, которая накладывается на общую картину сварочного напряжения.

Установки для механизированной сварки состоят из выпрямителя и механизма подачи проволоки со специальными роликами. Конструкция механизма подачи должна обеспечивать надежное и стабильное поступление мягкой алюминиевой проволоки. Обычно в таких механизмах предусматривают две пары специальных ведущих и прижимных роликов, что уменьшает возможность проскальзывания проволоки и ее смятие.

Повысить качество металла шва алюминиевых сплавов удастся применением техники управляемого переноса металла при импульсно-дуговой сварке. Импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом отличается от обычной тем, что на постоянный ток обратной полярности, получаемый от основного источника питания, накладываются кратковременные импульсы тока с определенной частотой (как правило, 50 или 100 Гц). Импульсы генерируются импульсным устройством для получения мелкокапельного направленного переноса электродного металла через дугу при более низких значениях сварочного тока, чем это имеет место при естественном мелкокапельном переносе. Величину и длительность импульсов сварочного тока выбирают такими, чтобы можно было обеспечить управляемый перенос металла с торца электрода небольшими кап-

лями в широком диапазоне токов. Как правило, в паузах между импульсами значение тока небольшое, но достаточное для поддержания такого горения сварочной дуги, при котором ввод теплоты в изделие уменьшается и отсутствует перенос металла.

Импульсно-дуговая сварка обеспечивает повышение механических свойств наплавленного металла и сварных соединений в целом, улучшает стабильность процесса, позволяет выполнять сварку в различных пространственных положениях с улучшенным формированием швов, существенно стабилизировать провар корня шва. Для ее осуществления используют источник питания ВДГИ-302, который комплектуется подающим механизмом ПДИ-304. При выборе оборудования предпочтение отдаются агрегатам с механизмами подачи тянущего типа.

Стыковые швы выполняют при силе тока 200-450 А и напряжении на дуге 22-26 В. Наиболее распространены V-образная и X-образная разделки кромок с углом раскрытия 70-90° либо U-образная с углом раскрытия 30° и притуплением до 6 мм. Такое раскрытие кромок необходимо для размещения в разделке наконечника горелки. Число проходов может составлять от 2 до 20 в зависимости от толщины свариваемых деталей, диаметра электродной проволоки и вида разделки. Угловые швы сваривают проволокой диаметром 1,5-2 мм при силе сварочного тока 200-300 А, напряжении дуги 16-24 В, расходе аргона до 15 дм³/мин.

Для сварки алюминиевых сплавов различного назначения промышленность выпускает ряд флюсов на базе галоидных солей, щелочных и щелочноземельных металлов.

Автоматическую сварку плавящимся электродом по слою флюса выполняют с использованием фторидно-хлоридных флюсов марок АН-А1 и АН-А4. Для алюминиево-магниевого сплава используют флюсы, не содержащие NaCl, так как в результате восстановления натрия усиливается пористость и снижается пластичность

сварных швов. Флюс марки АН-А1 используется для соединения технического алюминия. Ширина и толщина слоя насыпаемого флюса зависят от толщины алюминиевого листа (как правило, ширина составляет 25-45 мм, а толщина 7-16 мм). Во избежание протекнов жидкого металла с обратной стороны сварного шва требуется стальная формирующая подкладка. Флюс также наносят на присадочную проволоку и кромки чистой кистью; можно погружать конец проволоки в разведенный флюс. Сваривать соединения внахлест не рекомендуется ввиду трудности последующего удаления остатков флюса, попавшего в зазор.

Термическая обработка сварных соединений алюминиевых сплавов применяется для повышения уровня механических свойств металла шва и зоны термического влияния, а также для снижения остаточных напряжений в конструкции.

Прочность сварного соединения термически упрочняемых сплавов можно поднять до уровня основного металла последующей термообработкой сварного узла по циклу закалка и искусственное старение.

Общий отпуск сварной конструкции состоит в равномерном нагреве объекта по всей поверхности и толщине, медленном охлаждении, способствующем устранению возможных градиентов температуры в сечениях сварной конструкции. Иногда отпуск совпадает с операциями искусственного старения и стабилизации структуры. Общий отпуск обязателен для сварных толстостенных конструкций, работающих при критических температурах и содержащих опасные для жизни жидкости и газы. Для обеспечения после отпуска требуемой формы конструкции необходимо заключить ее в специальное жесткое приспособление, свободное от собственных остаточных напряжений. Отпуск способствует повышению сопротивляемости хрупким разрушениям при низких температурах,

устранению остаточных напряжений, улучшению коррозионной стойкости, восстановлению пластических свойств сварного соединения. Отпуск применяется в основном для сварных соединений нетермоупрочняемых алюминиевых сплавов, таких как АМц, АМгЗ, АМг6.

Равнопрочность (при сохранении пластических характеристик) сварного соединения при сварке сплавов в нагартованном или термически обработанном состоянии обеспечивается утолщением кромок в зоне сварки. Другим методом повышения механических свойств сварных соединений является проковка, прокатка роликами шва в холодном или нагретом состоянии.

Плазменная сварка благодаря высокой концентрации энергии в точке нагрева и глубокому проплавлению считается перспективным способом соединения алюминия и его сплавов. В результате глубокого проплавления резко возрастает доля основного металла, участвующего в формировании сварного шва, но при этом требуется соблюдать точность при сборке деталей под сварку и ведении горелки по стыку. Для сплавов из алюминия необходимо питание плазменной дуги переменным током.

По сравнению с аргонодуговой сваркой неплавящимся вольфрамовым электродом плазменная сварка имеет следующие преимущества:

- меньшее влияние возможного изменения расстояния от торца сопла до изделия на геометрические размеры зоны проплавления;
- меньшее влияние изменения тока на форму дуги, а, следовательно, и на стабильность проплавления металла;
- высокую надежность зажигания дуги благодаря дежурной дуге;
- отсутствие включений вольфрама в сварном соединении;
- повышенную скорость сварки;
- меньшее тепловложение и, следовательно, коробление изделий.

При одинаковых условиях плазменная сварка требует тока в два раза меньше по сравнению с аргонодуговой сваркой, сварные швы более узкие и с уменьшенной зоной термического влияния, благодаря чему уменьшается деформация конструкций.

Недостатком плазменной сварки является то, что применяются водоохлаждаемые плазменные горелки и значительно усложняется и удорожается оборудование.

Плазменная сварка алюминия и его сплавов выполняется сжатой дугой постоянного тока обратной полярности. Электрод в такой горелке служит анодом.

Для плазменной сварки алюминия применяют установки типа УПС-301 (токи до 300 А) и УПС-501 (токи до 500 А). В последнее время наиболее часто применяют источник питания ВД-306ДК или ВД-506ДК и приставку БУСП-ТИГ, которая служит для подключения плазменной горелки, регулировки тока дежурной дуги, базового тока, скорости нарастания-снижения базового тока, времени продувки до и после сварки и времени горения дежурной дуги после выключения основной сварочной дуги.

В качестве плазменной горелки часто применяли плазмотрон типа ПС-3, конструкция которого допускает использование медного или вольфрамового электродов.

При электронно-лучевой сварке оксидная пленка алюминия разрушается в результате воздействия на нее паров металла, а также из-за ее разложения в вакууме. Вакуум также способствует удалению водорода из сварного шва.

Электрошлаковая сварка. Для алюминия и алюминиевых сплавов толщиной 50-250 мм применяют электрошлаковую сварку на переменном токе пластинчатым электродом или плавящимся мундштуком под флюсами на основе хлористых солей щелочных и щелочноземельных металлов. Плотность тока в электроде обычно выбирают около $2,5 \text{ А/мм}^2$ при скорости сварки в пределах 6-8 м/ч.

Сплавы системы Al-Mg-Si (АВ, АДЗ1, АДЗЗ) характеризуются значительным снижением прочности сварного соединения по отношению к первоначальной прочности сплава. После полной термической обработки сварной конструкции, которая включает закалку (520-525 С) и искусственное старение (150-175°С, 12-14 ч), прочность металла шва составляет 0,7-0,8 прочности основного металла.

Авиали (АВ) свариваются хорошо, однако только с использованием присадочного материала; сваривать их сплавлением кромок не рекомендуется.

Дюралюмины относятся к несвариваемым сплавам. Единственный свариваемый алюминиево-медный сплав 1201 и его зарубежные аналоги.

Тройные сплавы алюминия с цинком и магнием свариваются хорошо только в том случае, если содержание этих легируемых элементов в сумме не превышает 7-7,5%.

К свариваемым относится отечественный сплав 1915. Сварные соединения сплава 1915 (система Al-Zn-Mg) упрочняются естественным старением, причем интенсивно – в течение 15 суток после сварки. В течение последующих 15 суток старения механические свойства сварных соединений изменяются незначительно.

Структура сварных соединений сплава 1911 (система Al-Zn-Mg) характеризуется присутствием в шве и зоне сплавления зернограничных выделений фаз, которые образуются из основных легирующих элементов, а также частиц интерметаллидов. Наилучшее сочетание механических свойств и коррозионной стойкости достигается при местной термической обработке, предусматривающей нагревы до 300°С или выше по кривой ограниченной растворимости выше 400°С. Местная термическая обработка в сочетании с последующим искусственным старением сварных соединений позволяет получить коэффициент прочности не ниже 0,65, высокие пластичность, вязкость разрушения благодаря повышению стойкости против коррозионного разрушения и снижению уровня остаточных напряжений.

Сварные соединения сплава 1420 после сварки имеют коэффициент прочности 0,70-0,75. Термическая обработка, включающая закалку с 450°C с охлаждением на воздухе и искусственное старение 120°C, 5 ч позволяет повысить коэффициент прочности до 0,90-0,92.

Равнопрочность (при сохранении пластических характеристик) сварного соединения при сварке сплавов в нагартованном или термически обработанном состоянии обеспечивается утолщением кромок в зоне сварки. Другим методом повышения механических свойств сварных соединений является проковка, прокатка роликами шва в холодном или нагретом состоянии.

Контрольные вопросы

1. Какие основные свойства цветных металлов и сплавов влияют на свариваемость?
2. Назовите основные свойства алюминия и его сплавов.
3. Перечислите основные затруднения при сварке алюминия и его сплавов. Чем они обусловлены и как решаются?
4. Какая проволока используется при сварке алюминиевых сплавов?
5. В чем особенности подготовки кромок под сварку алюминиевых сплавов?
6. Какие флюсы используют при сварке алюминиевых сплавов? Какова цель их использования?

2 СВАРКА ТИТАНОВЫХ СПЛАВОВ

2.1 Особенности сварки титана и его сплавов

Титановые сплавы – перспективный материал для производства сварных конструкций в аэрокосмической отрасли, поскольку имеют следующие преимущества по сравнению с другими конструкционными материалами:

- высокую удельную прочность вплоть до температур 450-500°C;
- отличную коррозионную стойкость и нейтральность ко многим агрессивным средам (выше, чем у нержавеющей стали) при температуре до 200°C;
- немагнитность;
- хорошая жаропрочность при температурах эксплуатации до 500-600°C.

К основным затруднениям, встречающимся при сварке титана, относится большая химическая активность металла при высокой температуре, особенно в расплавленном состоянии, по отношению к газам (кислороду, азоту и водороду).

Окисление титана начинается при температурах 400-500°C. Увеличение содержания кислорода резко повышает прочность, твердость и снижает пластичность металла. Азот еще в большей степени, чем кислород, снижает пластичность и повышает прочность и твердость титана. Поверхностный слой титана, насыщенный кислородом и азотом, имеет высокую твердость и носит название альфирированного слоя. Попадание частиц этого слоя в сварной шов снижает пластичность металла и перед сваркой его следует полностью удалять.

Водород оказывает большое влияние на механические свойства титана, особенно на ударную вязкость. Падение ударной вязкости с повышением содержания водорода в металле связано с выделением по границам зерен тонких прослоек хрупких гидридов.

Хрупкость, вызванная водородом, может проявляться и со временем, после вылеживания металла, и приводить к трещинам и разрывам (так называемое замедленное разрушение). Водородная хрупкость особенно опасна для сварных конструкций, так как сварные швы с характерной крупнокристаллической структурой и сварочными напряжениями склонны к образованию и развитию трещин.

Углерод растворяется в титане в незначительном количестве. Он образует химические соединения – карбиды, которые охрупчивают металл.

Для обеспечения хорошей свариваемости количество примесей – газов и углерода – в полуфабрикатах из титанового сплава ограничивают.

Высокая химическая активность титана по отношению к газам атмосферы в нагретом и особенно в жидком состоянии затрудняет горячую обработку этих металлов, в том числе сварку. Поэтому обязательным условием получения качественного соединения при сварке титана плавлением является надежная защита от газов атмосферы не только сварочной ванны, но и остывающих участков металла шва и околошовной зоны вплоть до 300-400°C. Необходимо также тщательно защищать и обратную сторону (корень) шва даже в том случае, если слои металла не расплавились, а только нагревались выше этой температуры.

Дополнительные затруднения при сварке титана создает большая его склонность к росту зерен при нагреве до высокой температуры. Низкая теплопроводность титана способствует увеличению времени пребывания шва и околошовной зоны при высокой температуре, усугубляя этим рост зерен. Для преодоления указанного затруднения сварку плавлением выполняют при минимально возможной погонной энергии.

По сравнению с другими конструкционными металлами титан имеет максимальную температуру плавления 1668°C. Поэтому при сварке титана требуются концентрированные источники теплоты.

Особенностями сварки титана также являются:

- титан немагнитен, поэтому нет опасности магнитного дутья, но в тоже время нельзя применять для сварки магнитные стелды.

- в расплавленном состоянии титан жидкотекуч и обладает высоким коэффициентом поверхностного натяжения. Вследствие этого сварные соединения склонны к прожогам и поэтому к сборке стыков предъявляются жесткие требования.

Титан и его сплавы не склонны к образованию кристаллизационных трещин в металле шва. Это объясняется благоприятным сочетанием физико-механических свойств титана и его сплавов: малой величиной литейной усадки наряду с повышенной прочностью и пластичностью металла в области высоких температур. Кроме того, для титановых швов характерен узкий интервал кристаллизации. Так как пластичность металла в этом интервале высока, сварные швы титановых сплавов стойки против образования кристаллизационных трещин.

Наиболее частыми дефектами сварных швов являются *поры и холодные трещины*. Основная причина образования пор в швах – газовые примеси (в первую очередь водород), растворенные в основном и присадочном металле и адсорбированные на поверхностях свариваемых кромок и проволоки. Значительную роль в образовании пористости в титановых швах играют наследственные дефекты полуфабрикатов – газовые коллекторы и микропоры, на базе которых при сварке зарождаются газовые пузырьки. Для получения беспористых швов необходима требуемая чистота основного металла и сварочных материалов, а также чистота обработки кромок. Наиболее радикальным методом предупреждения пор в швах является применение галогенидных флюсов при сварке.

Холодные трещины в сварном соединении возникают при понижении пластичности разных его участков, а также при повышенном содержании в основном металле и шве примесей внедрения –

газов. Трещины такого типа могут возникать сразу же после сварки, а также после вылеживания сварных изделий. Основной причиной замедленного разрушения является выделение водорода из твердого раствора с образованием гидридов титана, связанное с охрупчиванием металла в результате возникновения локальных внутренних напряжений. Последние складываются с остаточными растягивающими напряжениями, а также с напряжениями от внешней нагрузки.

В таблице 2.1 представлены основные трудности при сварке титановых сплавов.

Таблица 2.1. Основные трудности при сварке титановых сплавов

№	Трудность	Сущность	Меры борьбы
1	Высокая химическая активность	Поглощение водорода и окисление при нагреве сплавов выше температуры 200°C	Защита сварочной ванны, околошовной зоны и корня шва инертным газом, вакуумом, специальными флюсами
2	Реакция металла на термический цикл	Рост зерна на участке перегрева, аллотропические превращения при $T = 882^{\circ}\text{C}$, при охлаждении наблюдаются закалочные явления в шве и ОШЗ, выпадение интерметаллидов, что вызывает охрупчивание сварного соединения	Выбор оптимальных методов сварки и режимов сварки на минимальной погонной энергии
3	Порообразование	Возбудитель пористости – водород. Уменьшение растворимости водорода в твердом металле по сравнению с жидким состоянием приводит к выделению водорода при кристаллизации сварного шва	Тщательная зачистка поверхности кромок и присадочного материала. Механическая обработка, пескоструйная обработка, травление. Вакуумный отжиг присадочного материала для снижения содержания водорода до 0,002...0,004%. Сварка под фторидными флюсами.

4	Склонность к задержанному разрушению (холодные трещины)	Повышенное содержание газов плюс внутренние напряжения. Водород выделяется из твердого раствора с образованием гидридов, являющихся концентраторами напряжения	Меры борьбы такие же, как и для борьбы с пористостью
---	---	--	--

Титан относится к металлам, которые претерпевают полиморфные превращения: при температуре 882°C происходит перестройка атомно-молекулярной решетки. Известны две аллотропические модификации титана: низкотемпературная α -модификация имеет гексагональную плотно упакованную решетку; высокотемпературная β -модификация, устойчивая от 882°C до температуры плавления, имеет объемно-центрированную кубическую решетку.

Легирующие элементы в значительной степени влияют на температуру полиморфного превращения, растворимость, стабилизацию той или иной фазы. Существуют следующие группы легирующих элементов:

- α -стабилизаторы, повышающие температуру полиморфного превращения, хорошо растворяющиеся в α -фазе и незначительно в β -фазе. Основным легирующим элементом является алюминий;
- β -стабилизаторы, делящиеся на две основные группы: изоморфные – неограниченно растворяющиеся в β -фазе (V, Nb, Ta, Mo, W) и эвтектоидообразующие, обладающие большей, но ограниченной растворимостью в β -фазе, чем в α -фазе (Mn, Fe, Cr, Co, Ni, Si, Sn и др.).

В зависимости от структуры в нормализованном состоянии титановые сплавы подразделяются на следующие классы:

- α -сплавы (структура, представленная α -фазой);
- α - + β -сплавы (структура, представленная α и β -фазами);
- β -сплавы (структура, представленная механически стабильной β -фазой).

Существуют также два переходных класса: а) псевдо- α -сплавы, структура которых состоит из α -фазы и небольшого количества β -фазы (не более 5%); б) псевдо- β -сплавы, структура которых представлена метастабильной β -фазой и небольшим количеством α -фазы.

В результате легирования титана изменяется температура полиморфного превращения. При этом стабилизируется α - или β -фаза, за счет чего получают сплавы различных фазовых составов (α , β , $\alpha+\beta$ или метастабильных α или β). Температура T полиморфного превращения некоторых промышленных сплавов титана с точностью $\pm 20^\circ\text{C}$ представлена в таблице 2.2.

Таблица 2.2. Температура полиморфного превращения титановых сплавов

Сплавы	Т°С	Сплавы	Т°С
BT1-00; BT1-0; OT4-0	900	BT8; BT9	990
OT4-1	920	BT15	800
OT4; BT6C; BT14	940	BT16	840
OT4-2	950	BT18, BT20	1000
BT4	960	BT22	860
BT3-1; BT6	970	AT3	1000
BT5-1; BT5	1020	ПТ-3В	1000

Сварку α -сплавов следует проводить при минимальных погонных энергиях из соображений ограничения роста зерна; ($\alpha + \beta$)-сплавы, где велика опасность образования хрупких промежуточных фаз и интерметаллидных соединений, целесообразно сваривать на мягких режимах с малыми скоростями охлаждения; β -сплавы со стабильной или метастабильной структурой следует сваривать со скоростями охлаждения, близкими к закалочным (рис. 2.1).

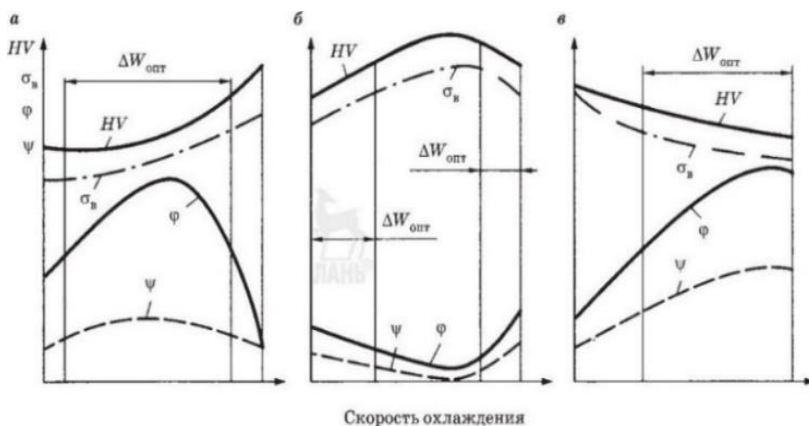


Рис. 2.1. Изменение механических свойств, α - (а), $\alpha + \beta$ - (б) и β -сплавов (в) титана в околошовной зоне в зависимости от скорости охлаждения при сварке: HV – твердость по Виккерсу; $\sigma_{в}$ – предел прочности; φ – угол изгиба; ψ – относительное сужение; $\Delta W_{\text{опт}}$ – интервал скоростей охлаждения, обеспечивающих оптимальные механические свойства материала

Титан и его сплавы чувствительны к термическому циклу сварки. В высокотемпературном интервале существования β -фазы наблюдается интенсивный рост зерна. Этому способствует и низкая теплопроводность титана. При быстром охлаждении ($\alpha + \beta$)-сплавов возможно образование хрупких фаз типа мартенситных, снижающих пластические свойства соединений и способствующих образованию холодных трещин. Такие же фазы могут появиться при медленном охлаждении метастабильных β -сплавов. Поэтому главным критерием для выбора режимов сварки сплавов титана является скорость охлаждения при температуре полиморфного превращения.

Значительное повышение прочности титана достигается его легированием. Для изготовления сварных конструкций применяют сплавы на основе титана прочностью от 500 до 1600 МПа (табл. 2.3).

Таблица 2.3. Состав и свойства некоторых титановых сплавов

Марки сплавов	Химический состав, %					Механические свойства в отожженном состоянии		
	Al	Mn	V	Mo	Прочие	σ_b , МПа	Ψ , %	кци, Дж/см ²
Деформируемые α -титановые сплавы								
BT4*	4	1,5	—	—		850-1050	1015	50-100
BT18*	7,5	11	0,7	1 Nb	0,3 Si	1100	9	20-40
Деформируемые ($\alpha + \beta$) -титановые сплавы								
BT6*	6,25	—	5	—	—	950-1100	8	40-80
BT9*	6,5	2	0,2	3,5	0,2 Fe	1100-1300	8-14	20-50
BT16**	2,5	—	4,5	4,5	—	1250-1450	4-6	40-50
BT22**	5,0	1	5,0	5,0	1 Fe	1300-1600	4-12	30
Деформируемые β -титановые сплавы								
BT15**	3	11	—	8	—	1300-1500	6	—
ИВТ**	3	5,5	—	7	3 Fe	1420-1700	7-10	—
Литейные титановые сплавы								
BT31Л*	5,5	2	—	2	0,2 Si	1050	5	30
BT21Л*	6,6	0,35	1,2	0,7	спсо	1000	4	20

Легирующие элементы и примеси в титановых сплавах принято классифицировать в зависимости от их влияния на температуру полиморфного превращения, т. е. на повышающие ее (α -стаби-

лизаторы) и понижающие β -стабилизаторы). Наиболее широко распространенным α -стабилизатором, добавляемым почти во все сплавы титана, является Al. Кроме него в группу « α » входят Ga, In и такие примеси, как O, N и C. К β -стабилизаторам относятся Mo, Cr, V, Mn, Nb, Fe, Si и др.; из примесей – водород. Существуют и элементы, которые практически не влияют на температуру полиморфного превращения, – это Sn, Zr, Ge. Такие элементы называют нейтральными упрочнителями.

Главные требования к свариваемым конструкционным сплавам – свариваемость, технологическая пластичность для обеспечения формообразования, а также повышенные прочность и жаропрочность.

Чувствительность к сварочному термическому циклу выражается в протекании полиморфного превращения $\alpha \leq \geq \beta$, в резком росте размеров зерна β -фазы и перегреве на стадии нагрева, в образовании хрупких фаз при охлаждении и старении, в неоднородности свойств сварных соединений, зависящих от химического и фазового состава сплава. Перегрев шва и ЗТВ связан с низкой теплопроводностью титана. Устранить указанные трудности удастся при оптимальных режимах сварки, которые заключаются в снижении погонной энергии для α и псевдо- α -сплавов и в увеличении погонной энергии для $\alpha + \beta$ -сплавов. Положительные результаты дает применение концентрированных источников энергии (лазерный и электронный луч).

В структуре α -сплавов преобладает (более 95%) α -твердый раствор титана. Как правило, это группа сплавов, легированных α -стабилизаторами и нейтральными упрочнителями (Al, Sn, Zr). К ним относятся ВТ5 ВТ5-1.

В дополнение к упрочнению легированием используется упрочнение нагартовкой.

Низколегированные титановые сплавы с α - и псевдо- α -структурой удовлетворительно свариваются различными способами сварки

плавлением, при стабильном формировании шва, отсутствии трещин и с высокими механическими свойствами сварных соединений.

Одним из важных критериев свариваемости сплавов этого класса является незначительная чувствительность к изменению режимов сварки. Однофазные α -сплавы имеют широкий интервал скоростей охлаждения, при котором сохраняются достаточно высокие свойства соединений. Наибольшие значения характеристик пластичности сварных соединений достигаются при средних и относительно высоких скоростях охлаждения.

Для обеспечения высокого уровня пластичности швов, равнопрочных с основным металлом, используют присадочные проволоки ВТ1-00, ОТ4, ОТ4-1, ВТ2св (ГОСТ 27265-87) отличающиеся по химическому составу от основного металла и имеющие по сравнению с ним пониженную концентрацию легирующих элементов.

Сплавы с α - и псевдо- α -структурой не упрочняются термической обработкой. С целью снятия напряжений конструкции с жесткими соединениями подвергаются отжигу, который включает нагрев при температурах выше температуры начала рекристаллизации, но ниже температуры полиморфного превращения и последующее охлаждение на воздухе. Характерные температуры отжига α -сплавов представлены в таблице 2.4.

Таблица 2.4. Температуры отжига α -сплавов

Марка сплавов	T°С
ВТ1-0, ВТ1-00	670-690
ОТ4-0, АТ-2	690-710
ОТ4-1, АТ3, ОТ4	740-760
АТ6, ОТ-2, ВТ5-1, ТС5	800-850

Продолжительность отжига составляет 15-60 мин в зависимости от сечения детали. Отжиг сварных соединений α -сплавов титана повышает их сопротивляемость развитию трещин. Нагрев сварных конструкций рекомендуется производить в электрических печах с защитной атмосферой.

Титановые двухфазные ($\alpha + \beta$)-сплавы (например, ВТ3-1, ВТ6, ВТ14, ВТ22) обладают ограниченной свариваемостью и требуют термической обработки после сварки. Сплавы по свариваемости уступают α -сплавам, так как более чувствительны к изменению параметров режима сварки, а необходимый уровень свойств соединения достигается термической обработкой, применением определенных присадочных материалов или утолщением кромок.

Чувствительность двухфазных сплавов к термическим циклам сварки проявляется в существенном изменении механических свойств сварных соединений в зависимости от затрат погонной энергии и соответствующих им скоростей охлаждения металла ЗТВ. Значения оптимальных скоростей охлаждения зависят от количества легирующих элементов в сплаве, от стабильности β -фазы и особенностей кинетики ее распада. В общем случае с увеличением степени легирования ($\alpha + \beta$)-сплава скорость охлаждения следует уменьшать. У наиболее распространенного сплава ВТ6 скорость охлаждения не должна превышать $40^\circ\text{C}/\text{с}$. В сплавах с большей степенью легирования (ВТ14, ВТ22) независимо от скорости охлаждения ($1-600^\circ\text{C}/\text{с}$) наблюдается меньшая пластичность металла ЗТВ. Поэтому для обеспечения оптимальной структуры и высоких механических свойств металла ЗТВ необходим соответствующий выбор параметров режимов сварки применительно к типу соединения.

Достижение требуемых механических свойств металла шва обеспечивается соответствующим выбором присадочной проволоки, состав которой должен быть близким к составу основного металла, но с уменьшенной степенью легирования.

Снижение чувствительности шва к трещинам и повышение работоспособности швов в условиях длительного нагружения достигается отжигом. Необходимость отжига сварных конструкций из $(\alpha + \beta)$ -сплавов обусловлена прежде всего возникновением в соединениях метастабильных фаз, склонных к распаду при последующих нагревах, а в некоторых случаях и при приложении внешних нагрузок.

Рекомендуемые режимы отжига для сварных соединений некоторых $(\alpha + \beta)$ -сплавов титана указаны в таблице 2.5.

Температура отжига для снятия остаточных напряжений применительно к этим сплавам составляет 550-650°C.

Таблица 2.5. Режимы отжига для сварных соединений $(\alpha + \beta)$ -сплавов титана

Марка сплавов	$T_{отж}$ °C
BT6, BT6C	750–800°C
BT14	740–850°C
BT16	730–770°C
BT22, BT23	740–760°C

Высокопрочные титановые $(\alpha + \beta)$ -сплавы наиболее эффективно применять в термоупрочненном состоянии. В связи с тем, что после сварки основной металл и сварное соединение имеют различный фазовый состав, с отличающейся стабильностью отдельных фаз, режимы термообработки, рекомендуемые для основного металла, как правило, не приемлемы для сварных соединений. Основная трудность в подборе режимов термообработки связана со снижением пластичности сварных соединений. Термообработка заклю-

чается в закалке с последующим старением. В зависимости от химического состава сплава, степени легирования и для металла разных плавок выбирают различные режимы термической обработки.

С целью повышения пластичности сварных соединений проводят высокотемпературный отжиг, т.е. предварительную подготовку структуры сварного соединения, перед упрочняющей термообработкой.

Для сплавов типа ВТ22, ВТ23 эффективным методом повышения пластичности сварных соединений является термоциклирование в интервале температур 950-550°C, заключающийся в многократном нагреве и выдержке при определенной температуре с последующим медленным охлаждением.

Обеспечение равнопрочности соединений при сохранении необходимой пластичности и вязкости в термически упрочненном состоянии достигается при использовании комплексно-легированных присадок, содержащих редкоземельные металлы (ванадий, гадолиний и др.), рений, цирконий, гафний и особых режимов термообработки. Обеспечение равнопрочности достигается также за счет утолщения свариваемых кромок.

При сварке высоколегированных β -сплавов возникают существенные трудности, связанные с повышенной чувствительностью их к примесям- газам, со спецификой фазовых и структурных превращений в сварных швах и в ЗТВ. Эти сплавы весьма подвержены влиянию скорости охлаждения после нагрева до высоких температур – с уменьшением скорости охлаждения снижаются их пластические характеристики. Оптимальные скорости охлаждения при сварке для сплавов такого типа высоки – они находятся в пределах 100-500°C/с. Наиболее перспективными для β -сплавов титана являются способы сварки с жесткими режимами. Рекомендуется применять электронно-лучевую сварку, а также аргонодуговую с активизирующим флюсом и лазерную сварку.

Термическая обработка сварных соединений повышает прочность, но снижает пластичность шва.

Повышение прочности и пластичности сварных соединений достигается механико-термической обработкой.

2.2 Технологические процессы сварки титановых сплавов

Большое значение для получения качественных сварных соединений имеет состояние поверхности соединяемых кромок и прищадочного металла. Сварку начинают после того, как снят газонасыщенный слой. Он удаляется механическим способом. Газовая резка используется как предварительная, так как кромки металла насыщаются газами, и этот слой необходимо удалить. В тех случаях, когда нельзя применить такой способ, используют гидропескоструйную или дробеструйную обработку с последующим травлением поверхности металла в смеси кислот.

Непосредственно перед сваркой кромки зачищают шабером или металлической щеткой на ширине 15-20 мм от стыка и обезжиривают спиртом-ректификатом, ацетоном или другим жирорастворителем.

В зависимости от толщины соединяемых деталей сварку выполняют без разделки, с V-, X-, U-образными разделками и замковыми соединениями. На рис.2.2 показаны типы разделок кромок для сварки титановых сплавов.

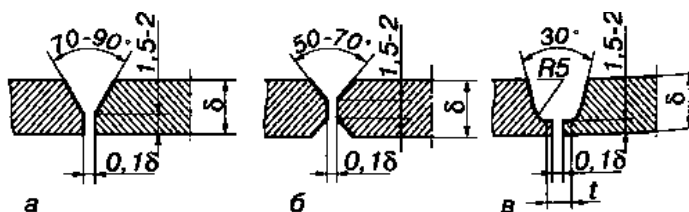


Рис. 2.2. Разделки кромок для многослойной сварки стыковых соединений из титана разных толщин: а – $\delta=4-10$ мм; б – $\delta=10-25$ мм; в – $\delta>25$ мм

Обезжиривают также сварочную проволоку. Сварочная проволока поставляется заводами-изготовителями после термической обработки, дегазированной в вакууме (для очищения от водорода), с травленной поверхностью. Установлено, что основным поставщиком газообразующих веществ в сварочную ванну является поверхность присадочной проволоки. Чтобы исключить появление пор, необходимо полностью удалять загрязненный поверхностный слой проволоки.

Особенности сборки титановых сплавов:

- из-за большого коэффициента поверхностного натяжения и высокой текучести необходимо высокое качество сборки;
- недопустимы правка и подгонка деталей и использование местного нагрева газовым пламенем;
- правка и подгонка в холодном состоянии затруднены в связи со значительным пружинением титана.

Во избежание излишнего перегрева околошовных участков сварного соединения при сварке плавлением титана и его сплавов необходимо ограничивать силу сварочного тока. Обычно при сварке титана неплавящимся электродом ток не превышает 300 А (табл. 2.6). Сварка осуществляется постоянным током при прямой полярности (минус на электроде).

При таком токе удается сваривать без разделки кромок за один проход сплавы толщиной до 3 мм. Сварку титановых сплавов больших толщин выполняют в несколько проходов с разделкой кромок (рис. 2.2) и подачей присадочного металла. Для хорошего формирования обратного валика рекомендуется рюмкообразная форма разделки кромок. Режим выполнения корневого прохода и высоту притупления выбирают так, чтобы ширина шва не превышала размеров плоского участка.

Таблица 2.6. **Параметры режима ручной аргонодуговой сварки титана и его сплавов неплавящимся электродом**

Толщина свариваемых кромок, мм	Сила тока, А	Диаметр присадочного материала (проволоки), мм	Диаметр мундштука, мм	Расход аргона через горелку, л/мин
0,5	15-30	1,0	8-10	8-12
1,0	50-60	1,5	8--10	8--12
2,0	80-100	2,0	10-12	10--14
3,0	120-140	3,0	10-12	10—14
4,0	120-150	3,0	12-16	12-16
5,0	130-160	3,0	12-16	12-16
7,0	140-180	3,0-4,0	12-16	12-16
10,0	160- 200	3,0-4,0	12-16	12-16

Для сварки титана и его сплавов наиболее широкое применение находит универсальный способ сварки плавлением неплавящимся лантанированным или иттрированным вольфрамовым электродом или плавящимся электродом в среде инертных газов или их смесей. Сварка выполняется со струйной защитой на воздухе и в камерах с контролируемой атмосферой.

Качество сварных соединений определяется надежностью защиты зоны сварки и чистотой инертного газа. Для защиты зоны сварки употребляется аргон высшего сорта по ГОСТ 10157-79 и гелий высокой чистоты по ГОСТ 20461-75 или смеси этих газов. Гелий и его смеси с аргоном целесообразно использовать при дуговой сварке плавящимся электродом больших толщин (8-10 мм). При сварке в гелии расход газа, необходимый для защиты сварочной ванны, в 2-3 раза больше, напряжение на дуге в 1,4-1,6 раза выше,

а ширина зоны расплавления в 1,4 раза больше, чем при сварке в аргоне. В связи с низкой теплопроводностью титана стыковые швы при сварке в аргоне имеют характерную конусообразную форму с малым коэффициентом формы шва. При сварке в гелии швы получают лучшей формы из-за более высокого напряжения дуги. Расход газа через сопло – 15...20 дм³/мин, в подкладку – 2,0-2,5 дм³/мин.

Сварка на воздухе со струйной защитой, осуществляется непрерывным обдувом сварочной ванны и остывающих участков соединения путем перемещения горелки с соплом и специальной удлиненной насадкой (рис. 2.3 а). Длина и ширина насадки должны соответствовать размерам изотермы. Газозащитная насадка должна защищать металл участка, нагретого до температуры 350-400°С, с лицевой и обратной стороны шва. Размеры изотермы обычно определяют расчетным путем по формулам распространения теплоты в металлах при сварке.

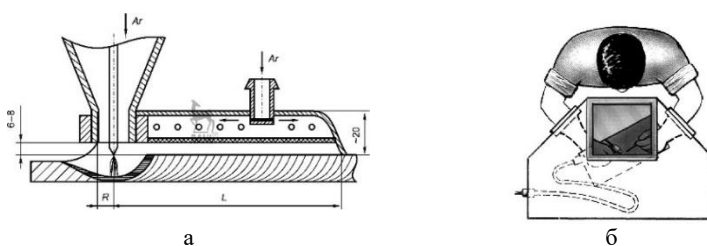


Рис. 2.3. Способы защиты металла сварного соединения в процессе сварки титановых сплавов:
а – на воздухе со струйной подачей инертного газа;
б – путем использования местных камер

Обратный валик (корень шва) защищают с помощью специальных подкладок с отверстиями или раструбов, продуваемых инертным газом. При небольшой протяженности стыковых соединений можно ограничиться плотным поджатием кромок свариваемых деталей к медной или стальной подкладке. Защита корня шва при

сварке труб или сосудов может быть достигнута путем пропускания инертного газа внутрь изделия. После окончания сварки или обрыва дуги необходимо продолжать подачу газа до остывания металла примерно до 350-400°C.

В качестве источника питания применяют сварочные преобразователи типа ПС-300, ПС-500, ПСМ 1000 и выпрямители типа ВД-301, ВДУ 504, ВС-300, ВСВУ-630 и др. Для регулирования сварочного тока, а также для создания падающей характеристики у источников питания с жесткой характеристикой (например, ПСМ-1000) сварочный пост должен быть оснащен балластными реостатами РБ-201, РБ-301, РБГ-502 и др. Возбуждение дуги осуществляется с помощью осцилляторов ОСПЗ-2М, ОСПЗ-8М-1, ОСПП-300М, ОСП-88-1 и др. Расход инертного газа контролируют расходомерами типа У-3, ДЗР1-59 или ротаметрами типа РС-3, РС-5. Автоматическую сварку выполняют автоматами АРК, АДСВ-2, АД СВ-5 и др.

Общая защита узла производится в камере с контролируемой атмосферой инертного газа (рис. 2.3 б). Герметичную камеру, изготовленную из стали или прозрачного пластика, с размещенным в ней изделием, подвергают вакуумированию (разрежение 0,1-0,01 Па), а затем заполняют инертным газом при небольшом избыточном давлении. Сварка в камерах возможна автоматически или вручную. В последнем случае в стенках камеры размещают окна, в которых закрепляют резиновые перчатки. Оператор, находясь вне камеры, выполняет сварку, продевая руки в перчатки.

В связи с увеличением размеров и массы конструкций из наиболее распространенного химически активного металла – титана и его сплавов в последние годы стали применять большие, так называемые обитаемые камеры с инертной атмосферой. Оператор выполняет сварку, находясь внутри камеры в специальном скафандре. Камеры такого типа оборудованы системами шлюзования, очистки инертного газа, обеспечения сварщика воздухом и др.

Для предотвращения загрязнения швов вредными газами, которыми обогащается инертный газ при длительной работе, сварочные установки оборудуют измерительной аппаратурой, контролирующей содержание примесей в атмосфере камеры.

При сварке в камерах с контролируемой атмосферой достигается наиболее надежная защита, а в связи с этим и более стабильное качество сварных соединений. Поэтому такой способ является основным для всех химически активных металлов.

Защита только сварного соединения и узких участков, прилегающих к нему, что достигается с помощью малогабаритных разъемных камер. Заполнение накидных камер инертным газом после сборки может быть выполнено двумя способами: с предварительным вакуумированием камеры; путем многократного пропускания инертного газа через камеру, сопровождающегося вытеснением из нее воздуха. Первый способ более надежный и поэтому рекомендуется для тугоплавких металлов.

Сварку неплавящимся электродом выполняют непрерывно горящей или импульсной дугой.

Аргонодуговой сваркой вольфрамовым электродом детали толщиной 0,5-1,5 мм сваривают в стык без зазора и без присадки, а толщиной более 1,5 мм – с присадочной проволокой. Ручная сварка ведется без колебательных движений горелки на короткой дуге углом вперед. Угол между электродом и присадочной проволокой поддерживается в пределах 90°; проволока подается непрерывно.

Листы толщиной до 4 мм сваривают вольфрамовым электродом диаметром 1,6-3,0 мм на постоянном токе прямой полярности 50-200 А при скорости 30-50 м/ч на обычных установках для автоматической или ручной аргонодуговой сварки. Присадочный пруток диаметром 2,0-2,5 мм подают только при толщине металла более 1,5 мм. Без подачи присадочного прутка прочность соединения равна прочности основного металла. При подаче прутка его нагретая поверхность адсорбирует некоторое количество газов атмосферы, что приводит к снижению пластичности металла шва.

Для металла толщиной до 2,5 мм целесообразно применять импульсную сварку без присадочной проволоки.

При выполнении угловых и нахлесточных соединений крупногабаритных изделий, когда, поддув аргона затруднен, сварку можно производить без защиты обратной стороны шва, выполняя сварку на участках длиной 15-20 мм с перерывами при минимальном разогреве свариваемых элементов.

О надежности газовой защиты в процессе сварки и при последующем охлаждении шва можно судить по его внешнему виду. Блестящая серебристая поверхность свидетельствует о хорошей защите и удовлетворительных свойствах шва. Появление на шве желто-голубых цветов побежалости указывает на нарушение защиты, а серые налеты свидетельствуют о плохой защите. Простым для определения и достаточно надежным показателем качества шва может служить его твердость. При хорошей газовой защите твердость шва практически не превосходит твердости основного металла.

При толщине металла свыше 4 мм применяют разделку кромок V-, X- и U-образную. Для увеличения глубины проплавления при сварке вольфрамовым электродом на поверхность кромок наносят тонким слоем флюсы-пасты, которые позволяют без разделки кромок сваривать металл толщиной до 12 мм на меньших, чем обычно, сварочных токах. Эта технология снижает деформации сварных конструкций и уменьшает пористость швов, а также способствует частичному рафинированию металла шва.

При сварке вольфрамовым электродом погруженной дугой без разделки кромок также можно соединять листы повышенной толщины.

При механизированной сварке на токах до 250 А удовлетворительные результаты обеспечивают горелки, которыми укомплектованы автоматы АДСВ-2, АДСВ-5 и др. При сварке на больших то-

ках (до 700 А) находят применение горелки других типов, например, А-1272. Ориентировочные режимы механизированной сварки титана и его сплавов представлены в таблице 2.7. Данные об используемых в промышленности горелках приведены в таблице 2.8.

Применяется также автоматическая сварка неплавящимся электродом в среде инертных газов (ААДС). Она позволяет выполнять сварные соединения в широком диапазоне размеров и формы. К недостаткам ААДС следует отнести наличие пор в швах и значительные деформации сварных соединений.

Устранить или уменьшить эти недостатки при сварке титановых изделий толщиной 0,5-2 мм можно, применяя импульсно-дуговую автоматическую сварку (ИДС) неплавящимся электродом в среде инертных газов. При питании от специальных источников тока сварку ведут импульсами постоянного тока (полярность прямая). За каждым импульсом тока (продолжительностью 0,2-0,3 с) следует пауза (0,1-0,3 с), благодаря чему удастся выполнять сварку как бы точками с их перекрытием.

Таблица 2.7. Ориентировочные режимы механизированной сварки стыковых соединений из титана и его сплавов неплавящимся электродом в среде аргона

Толщина металла, мм	Количество проходов	Сварочный ток, А	Напряжение на дуге, В	Скорость сварки, ом/о
1,0	1	60-80	8-10	0,7-0,8
2,0	1	120-160	8-10	0,6-0,7
3,0	1	200-240	10-12	0,4-0,6
5,0	2-3	200-240	13-15	0,3-0,4
6,0	2-3	220-250	11-13	0,3-0,4
8,0	2-3	240-290	11-13	0,2-0,3

Таблица 2.8. Характеристики сварочных горелок

Тип горелки	Допускаемый ток, А	Диаметр вольфрамового электрода, мм	Масса горелки без шлангов, кг
ЭЗР-5	75	0,5; 1; 1,5	1,4
ЭЗР-3-66	150	1,5; 2; 3	0,8
РГА-150	150	0,8-3	0,3
ЭЗР-3-58	200	2-4	0,7
РГА 200	200	1-4	0,3
АР-9	350	1-6	0,45
РГА-400	400	4-6	0,4
ЭЗР-4-68	500	4-6	0,3

Примечание. Горелки ЭЗР с воздушным охлаждением, остальные – с водяным.

Поскольку при ИДС возникает необходимость возбуждать дугу с большой частотой, между вольфрамовым электродом и свариваемым изделием постоянно поддерживается (от отдельного источника питания) малоамперная, так называемая дежурная дуга ($I=0,8-2$ А), на которую накладывается рабочая основная дуга. В качестве источника питания дежурной дуги используют выпрямители ВСС-120, ВСС-300 и др. Регулируя ток, скорость, а также длительность импульса и паузы, можно в широких пределах изменять размеры шва. При этом заметно уменьшается перегрев металла, уменьшаются сварочные деформации.

Импульсная дуга обеспечивает хорошее формирование сварного шва с плавным переходом к основному металлу, а также

уменьшение неравномерности поля остаточных напряжений и концентрации напряжений в зоне сварки при эксплуатации изделия под нагрузкой.

В качестве источников питания при импульсно-дуговой сварке неплавящимся электродом используются как специализированные источники типа ИПИД и ВСВУ, так и приставки к обычным источникам.

Сварка плавящимся электродом производится постоянным током обратной полярности на режимах, обеспечивающих мелкокапельный перенос металла. Режимы сварки представлены в таблице 2.9. При сварке в монтажных условиях в различных пространственных положениях применяется импульсно-дуговая сварка плавящимся электродом в среде аргона.

При автоматической и механизированной сварке титановых сплавов необходимы мощные механизмы подачи проволоки, так как титан имеет большой коэффициент трения. Требуется также более жесткий контроль величины вылета электрода: он должен составлять 10–12 мм. При увеличении вылета электрода происходит его перегрев, поскольку титан имеет малый коэффициент теплопроводности и высокое электросопротивление.

Таблица 2.9. Режимы автоматической сварки титана плавящимся электродом

Толщина металла, мм	Метод сварки	Диаметр электродной проволоки, мм	Ток, А	Напряжение дуги, В	Скорость подачи электродной проволоки, м/ч	Скорость сварки, м/ч
2,5	Односторонний шов на остающейся подкладке	2	180--200	30--32	160-165	50

4	Одно- сторонний шов на остаю- щейся под- кладке	2,5	270-290	30--32	185--190	50
6	Одно- сторонний шов на медной подкладке	3	390--420	30--32	170--175	50
8	Одно- сторонний шов на медной подкладке	4	590--600	32--34	95--100	45
8	Двух- сторонний шов	3	310--330	30--32	135--140	50
10	Одно- сторонний шов на медной подкладке	4	600--620	32--34	110--115	45
12	Двух- сторонний шов	3	350--400	30--32	160--165	50

Сварку плавящимся электродом в среде инертных газов применяют для стыковых, тавровых и нахлесточных соединений из металла толщиной более 4 мм в нижнем положении. Обычно сварку листов толщиной до 36 мм ведут без разделки кромок. Способы защиты и сварочная оснастка в основном те же, что и при сварке вольфрамовым электродом.

При автоматической и механизированной сварке титановых сплавов необходимы мощные механизмы подачи проволоки, так как титан имеет большой коэффициент трения. Требуется также более жесткий контроль величины вылета электрода: он должен составлять 10-12 мм. При увеличении вылета электрода происходит

его перегрев, поскольку титан имеет малый коэффициент теплопроводности и высокое электросопротивление.

Сварку плавящимся электродом в среде инертных газов применяют для стыковых, тавровых и нахлесточных соединений из металла толщиной более 4 мм в нижнем положении. Обычно сварку листов толщиной до 36 мм ведут без разделки кромок. Способы защиты и сварочная оснастка в основном те же, что и при сварке вольфрамовым электродом.

При сварке в аргоне наблюдается меньшее разбрызгивание металла и больше глубина проплавления и относительно узкие швы. Сварные швы в гелии – более широкие. Лучшее формирование шва и стабильность процесса достигают при использовании смеси из 80% гелия и 20% аргона.

Сварку следует производить при обратной полярности на режимах, гарантирующих струйный перенос металла. Расход аргона обычно составляет 20-60 дм³/мин, а гелия – 30-120 дм³/мин. Вылет плавящегося электрода должен быть относительно небольшим из-за высокого электросопротивления титана и в зависимости от диаметра проволоки выбирается в пределах 10-55 мм.

При сварке стыковых соединений плавящимся электродом в два прохода (с двух сторон) можно сваривать металл без скоса кромок толщиной от 16 до 36 мм.

Для повышения производительности сварки применяют способ сварки титана по узкому зазору – щелевой разделке, выполняемый неплавящимся вольфрамовым или плавящимся электродом. В первом случае листы собирают с зазором 6-12 мм. Сварку ведут вольфрамовым электродом диаметром 4 мм с присадочной проволокой диаметром 1,5-2 мм при силе сварочного тока 200-300 А, расходе аргона 9-12 дм³/мин через горелку и 2-3 дм³/мин в подкладку с обратной стороны.

Сварка погруженной дугой позволяет за один проход сваривать металл толщиной 10-12 мм без разделки кромок. Недостатки такого способа – чрезмерная ширина шва и околошовной зоны.

Для сварки титановых сплавов толщиной более 3 мм применяется способ сварки под слоем флюса.

Из-за большой химической активности металла при высоких температурах к флюсу для сварки титана предъявляются особые требования. Флюс должен обеспечить надежную защиту зоны сварки от воздуха и не оказывать окислительного действия на металл шва. Важно, чтобы флюс предохранял шов от загрязнения водородом. Флюс должен быть тугоплавким. Этим требованиям удовлетворяют бескислородные фторидо-хлоридные флюсы сухой грануляции. Флюсы вводятся в зону сварки путем нанесения на кромки флюс-пасты.

Сварка ведется на постоянном токе обратной полярности на остающейся подкладке, на медной технологической подкладке или на флюсовой подушке.

Контрольные вопросы

1. Какие модификации имеют титановые сплавы?
2. Какими химическими элементами легируются титановые сплавы? Как классифицируются легирующие элементы?
3. Назовите особенности сварки титановых сплавов.
4. Назовите основные трудности при сварке титановых сплавов. Какая их сущность и меры борьбы с ними?
5. Назовите род и полярность тока при сварке титановых сплавов.
6. Какие источники питания используются при сварке титановых сплавов?
7. Какие методы используются для повышения производительности сварки титановых сплавов?
8. С какой целью при сварке титановых сплавов используются флюсы?

3 СВАРКА МАГНИЕВЫХ СПЛАВОВ

3.1 Физико-химические свойства магния и его сплавов

Магний и его сплавы являются наиболее легкими конструкционными материалами. Плотность магния $1,7\text{ г/см}^3$, т.е. почти в 1,5 раза меньше плотности алюминия и в 4,5 раза меньше плотности железа.

Чистый магний плавится при температуре 650° . Простые сплавы магния (МА1, МА8) плавятся также при этой температуре. Плавление более сложных сплавов происходит в широком интервале температуры в пределах $460\text{--}650^\circ$. Удельная теплоемкость магния примерно равна таковой для алюминия. Теплопроводность магния ниже теплопроводности алюминия.

Магний активнее, чем алюминий, соединяется с кислородом, образуя пленку окиси MgO . Однако эта пленка менее прочна, чем пленка окиси алюминия, и не защищает металл от коррозии. Поэтому магний и его сплавы неустойчивы против коррозии во многих средах. Температура плавления оксида магния 2800°C , плотность $3,65\text{ г/см}^3$. В связи с высокой температурой плавления оксидная пленка на поверхности магниевых сплавов так же, как и при сварке алюминия, затрудняет образование общей сварочной ванны и должна быть разрушена или удалена в процессе сварки.

Магний и его сплавы обладают небольшими прочностью и пластичностью, однако путем легирования удалось предел прочности магниевых сплавов довести до $24\text{--}26\text{ кг/мм}^2$ и даже выше, что приблизило удельную прочность этих сплавов к удельной прочности стали. Наибольшее влияние на упрочнение магния оказывают алюминий и цинк.

Сплавы на основе магния бывают литейные (МЛ1, МЛ5, МЛ10) и деформируемые (МА1, МА2, МА5).

Образующиеся в результате легирования интерметаллические соединения в значительной степени расширяют интервал кристаллизации магниевых сплавов.

Преимуществами магниевых сплавов являются хорошая обрабатываемость резанием, и высокая демпфирующая способность. Большим недостатком магниевых сплавов является низкая стойкость против коррозии во влажной атмосфере.

Магниевые сплавы применяются при необходимости использования меньшей, чем у других конструкционных материалов плотности при достаточной прочности, как жаропрочные, способные работать при температурах до 400° С. Вследствие высокой удельной прочности магниевые сплавы широко применяют в аэрокосмической, автомобильной и электротехнической промышленности. Из магниевых сплавов изготавливают детали бортовой аппаратуры, диски колес, корпуса кресел.

3.2 Особенности сварки магния и его сплавов

При сварке магниевых сплавов приходится учитывать следующие их особенности и свойства: более низкую теплопроводность, чем у алюминиевых сплавов; близость температуры воспламенения к температуре плавления; повышенные деформации и напряжения при сварке вследствие высокого коэффициента линейного расширения, высокую газопоглощаемость при расплавлении сплава, возможность образования кристаллизационных трещин вследствие наличия легкоплавких эвтектик и большого интервала температур кристаллизации; низкую коррозионную стойкость, требующую соответствующего выбора состава флюса и последующей химической обработки шва после сварки.

Низкая температура плавления и незначительная разница в температурах начала и конца плавления этих сплавов требуют при

их сварке особой осторожности и большого опыта для того, чтобы избежать проплавлений и прожогов металла.

Пленка окиси магния при сварке создает меньшие затруднения, чем пленка окиси алюминия, так как она не является непрерывной и не так плотно прилегает к поверхности сплава. Но окись магния плавится при температуре свыше 2500° и не растворяется в расплавленном магнии. Поэтому при сварке окись магния нужно удалять. При газовой сварке этого достигают применением флюсов, при аргонодуговой использованием способе катодного распыления, а при контактной сварке предварительной специальной очисткой поверхности магниевое сплава в месте сварки.

Высокая склонность магния к окислению является причиной легкости его воспламенения на воздухе. При сварке металлической дугой с плавящимся электродом опасность воспламенения магния резко увеличивается в момент перехода капель электродного металла через дуговой промежуток в шов. Эта опасность отсутствует при аргонодуговой сварке благодаря применению неплавящегося электрода и защитной среде из инертного газа.

Помимо интенсивного окисления, магниевые сплавы при нагревании до температур, близких к температуре плавления, активно соединяются с азотом, образуя нитрид магния. Вступая в реакцию с водяным паром, магний соединяется с кислородом с образованием MgO , а освобожденный водород растворяется в расплавленном металле, вызывая пористость шва после затвердевания. Нитрид магния разлагается водой на гидрат окиси магния и аммиак. Присутствие в сплаве окиси и нитридов магния снижает все показатели механических свойств магниевых сплавов, в особенности ударную вязкость.

Водород способен растворяться в магнии в гораздо больших количествах, чем в алюминии. При температуре плавления металла в нем растворяется до $50\text{см}^3/100\text{г}$ металла и резко снижается при его кристаллизации, поэтому могут возникнуть газовые поры.

Высокий коэффициент теплового расширения магниевых сплавов вызывает при сварке коробление конструкций.

Магний и магниевые сплавы обладают высокой жидкотекучестью. Для предотвращения «провала» сварочной ванны под действием собственной силы тяжести необходимо применять формирующие подкладки с канавкой.

Высокий коэффициент линейного расширения повышает склонность к образованию горячих трещин, короблению деталей. При жестком закреплении возможно образование холодных трещин.

В отличие от алюминиевых сплавов, пластичность магниевых сплавов значительно ниже, что и обуславливает их худшую свариваемость. Высокая теплопроводность магниевых сплавов приводит к большой скорости кристаллизации сварочной ванны и высокой скорости охлаждения сварного соединения, что обуславливает значительный темп деформации металла в эффективном интервале кристаллизации, а значит, снижает технологическую прочность сварных соединений. Высокая теплопроводность металла требует применения для сварки мощных и концентрированных источников энергии.

Магний склонен к образованию кристаллизационных трещин. Это обусловлено, во-первых, малой пластичностью самого сплава, а во-вторых, наличием в литой структуре остаточных напряжений и жесткостью самой конструкции. В сплавах системы магний – марганец (МЛ2, МА1) не образуются кристаллизационных трещин при сварке, но для сварных соединений характерны низкая прочность и малая пластичность вследствие образования крупнокристаллической структуры в околошовной зоне.

Сплавы МА8 имеют мелкозернистую структуру и достаточно хорошие механические свойства, но склонны к образованию кристаллизационных трещин. Для предотвращения этого процесса при

сварке применяют присадочную проволоку с повышенным содержанием легирующих компонентов.

Сплавы магния, содержащие цинк, ограниченно поддаются сварке.

При нагревании на воздухе до 550-600°С магний воспламеняется. Для предупреждения возгорания магния ванну и околовольную зону шириной 30мм (по обе стороны шва) защищают слоем флюса, растворяющего пленку оксида магния. В процессе кристаллизации магний склонен образовывать грубую крупнокристаллическую структуру.

3.3 Технология сварки магниевых сплавов

Одним из ранних методов сварки плавлением изделий из магниевых сплавов является газовая ацетиленокислородная сварка с флюсами на основе хлористых и фтористых солей. Флюс в зону сварки вносится в ванну с присадочным прутом или наносится на кромки свариваемых изделий в виде пасты. Газовую сварку применяют только для сплавов марок МА1, МА2, МА8, МЛ2, МЛ5 и МЛ7. Еще одним способом сварки магниевых сплавов является ручная дуговая сварка угольным электродом, также с использованием флюсом. Вместе с тем хлористые флюсы вызывают коррозию металла после сварки. Фторидные флюсы не вызывают коррозии, но они менее технологичны, так как имеют большую плотность и могут оставаться в шве. Оба эти процесса из-за применения флюсов и покрытий, опасных с точки зрения коррозии соединений, в настоящее время не применяются и не рекомендуются.

Аргонодуговая сварка является основным способом сварки магния и его сплавов. Важнейшим преимуществом аргонодуговой сварки перед другими способами является возможность сварки без флюса. При сварке этим способом исключается опасность коррозии, вызванной остатками флюсов. В связи с этим отпадает необходимость специальной обработки сварных изделий с целью удаления остатков флюсов.

Перед сваркой магниевых сплавов необходимо тщательно очистить поверхность металла от окисной и защитной пленок.

Сварку магниевых сплавов ведут неплавящимися вольфрамовыми и плавящимися электродами. Сварка производится на подкладках с глубокими канавками, обеспечивающими удаление оксидных включений и проплавов. Основное и наиболее желательное соединение – стыковое. При сварке нахлесточных, а иногда и тавровых соединений с неполным проплавлением сечения, оставшиеся зазоры могут стать в дальнейшем очагами коррозии. При сварке нахлесточных и тавровых соединений серьезной становится проблема борьбы с оксидными включениями в корневой части швов. При сварке стыковых соединений эта задача решается сравнительно просто применением сварки на подкладках с достаточно глубокими канавками, обеспечивающими удаление оксидных включений в проплав.

При сварке вольфрамовым электродом легче осуществляется надежная защита сварочного пространства от воздействия воздуха. Сварку производят переменным током, при этом обеспечивается достаточно полное удаление окисной пленки. Стыковые соединения сваривают на стальной подкладке с небольшой канавкой для формирования обратного валика. При сварке поддерживают, возможно, более короткую дугу. В данном случае полнее реализуются преимущества аргонодугового процесса – удаление окисной пленки действием электрического тока и надежная защита жидкого металла от окисления. Прочность сварных соединений составляет 60-90% прочности основного металла.

Для ручной сварки металла толщиной до 3 мм применяют вольфрамовые лантанированные или иттрированные электроды на сварочном токе $I_{св} = (30-40) d$. Автоматическая сварка возможна для металла толщиной от 1 мм и выше вольфрамовым электродом диаметром 2-6 мм на сварочном токе $I_{св} = (40-75) d$.

Сварка магниевых сплавов по технике выполнения аналогична сварке алюминиевых сплавов. Некоторые режимы ручной и автоматической аргонодуговой сварки неплавящимся вольфрамовым электродом с присадочным материалом приведены в таблицах 3.1 и 3.2.

Таблица 3.1. Ориентировочные режимы ручной аргонодуговой сварки магниевых сплавов

Тип разделки	Толщина деталей, мм	Сварочный ток, А	Диаметр присадочной проволоки, мм	Расход аргона, л/мин	Число проходов
Встык, без разделки	2	100-110	2,5	12-14	1
	3	170-190	2,5	12-14	1
	5	230-250	3-4	16-18	1
С разделкой	6	200-220	4	16-18	3
	8	220-240	4	16-18	3

Таблица 3.2. Режимы автоматической аргонодуговой сварки стыковых соединений неплавящимся электродом магниевых сплавов без разделки кромок

Толщина металла, мм	Сила сварочного тока, А	Скорость сварки, м/час	Диаметр присадочной проволоки, мм	Скорость подачи проволоки, м/час	Расход аргона, л/мин
2	165-175	24	2	120	12-14
3	180-200	18-20	2,5	95-100	14-16
5	260-270	18	2,5	100-110	16-18
6	280-290	18	2,5	90-100	16-18

В связи с недостаточной пластичностью магниевых сплавов отбортовка кромок не применяется. Встык без скоса кромок рекомендуется сваривать соединения только за один проход при односторонней сварке на подкладке. Двусторонняя сварка стыковых соединений без разделки кромок не рекомендуется из-за опасности появления в швах большого количества оксидных включений.

В связи с недостаточной пластичностью магниевых сплавов отбортовка кромок не применяется. Встык без скоса кромок рекомендуется сваривать соединения только за один проход при односторонней сварке на подкладке. Двусторонняя сварка стыковых соединений без разделки кромок не рекомендуется из-за опасности появления в швах большого количества оксидных включений.

Ручной и автоматической сваркой вольфрамовым электродом встык без разделки кромок за один проход могут быть сварены листы толщиной от 2 до 6 мм. При сварке соединений из металла толщиной более 6 мм применяют разделку с односторонним скосом кромок и для металла толщиной более 20 мм при наличии двустороннего подхода – разделку с двусторонним скосом кромок. В последнем случае перед выполнением шва с обратной стороны необходима предварительная разделка корня первого шва.

В качестве присадочного материала используют проволоку из сплава того же состава, что и у свариваемого металла. Проволоку перед сваркой обезжиривают и подвергают травлению в 20%-ном растворе азотной кислоты. Диаметр проволоки такой же, как и при сварке алюминиевых сплавов.

Сварку магниевых сплавов следует проводить с максимальной возможной скоростью, обеспечивающей достаточную скорость охлаждения и предупреждающей появление, трещин. Наилучшие результаты получают при однопроходной сварке.

Для металла толщиной более 5 мм может быть использована дуговая сварка плавящимся электродом со струйным переносом электродного металла. Процесс ведется на постоянном токе обрат-

ной полярности. Сварка плавящимся электродом особенно эффективна для соединения металла большой толщины. Для сварки используется электродная проволока небольшого диаметра: 1-3 мм; величина тока $I_{св} = (130-150) d$. При сварке встык без скоса кромок за один проход плавящимся электродом могут быть сварены листы толщиной от 5 до 10 мм.

Механические свойства сварных соединений ниже свойств основного металла. Прочность сварных соединений можно несколько повысить путем их проковки. Перед проковкой место соединения необходимо прогреть до 200-300°C. В таблице 3.3 приведен предел прочности сварных соединений образцов без проковки и с проковкой.

Таблица 3.3. Прочность сварных соединений магния и его сплавов, выполненных плавящимся электродом

Свариваемый металл	Предел прочности образцов без проковки в кг/мм ²	Предел прочности образцов с проковкой в кг/мм ²
Магний	10-12	16-17
МА1	12-14	18-19
МА2	20-24	23-24
МА8	16-18,5	19-20

Хорошие результаты получаются при использовании для магниевых сплавов способа сварки трехфазной дугой неплавящимися электродами в среде аргона. Широкие технологические возможности этого способа позволяют проводить сварку и получать сварные соединения с высокой технологической прочностью, даже при условии отсутствия общего подогрева изделия.

Технология термической обработки сварных соединений магниевых сплавов аналогична термической обработке сварных соединений алюминиевых сплавов. Для сварных соединений термически

неупрочняемых сплавов применяется отжиг; для сварных соединений термически упрочняемых сплавов – закалка и искусственное старение.

Особенностью магниевых сплавов является малая скорость диффузионных процессов (фазовые превращения протекают медленно), что требует большой выдержки под закалку и старение. По этой причине закалка сплавов возможна только на воздухе.

Деформируемые магниевые сплавы марок МА1, МА8, МА14 подвергаются термическому упрочнению по режиму: нагрев под закалку до 410-415°C, выдержка 15-18 ч, охлаждение на воздухе и искусственное старение при 175°C в течение 15-16 ч; после термообработки $\sigma_v = 320\text{--}430$ МПа, $\delta = 6\text{--}14\%$.

Простейшие сплавы магния, содержащие 1,3-2,5% марганца термической обработке не подвергаются.

Во избежание холодных трещин сваренные узлы обычно подвергаются отжигу при температуре 250° С в течение 0,5-1 ч.

Контрольные вопросы

1. Особенность оксидной пленки, образующейся на поверхности магния и его сплавов.
2. Что является причиной образования газовых пор при сварке магния и его сплавов?
3. Почему не рекомендуется двухсторонняя сварка без разделки кромок?
4. В каких случаях рекомендуется сварка встык без разделки кромок?
5. В чем особенность подкладок для сварки магния и его сплавов?
6. В каком случае применяется сварка с разделкой корня шва?
7. В каком случае особенно эффективна сварка плавящимся электродом?

4 ТЕХНОЛОГИЧНОСТЬ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ АЭРОКОСМИЧЕСКОЙ ТЕХНИКИ

Технические преимущества сварных конструкций по сравнению с конструкциями, изготовленными с использованием других методов получения неразъемных соединений, обеспечили им широкое распространение в производстве авиационных конструкций. Вместе с тем, сварочные технологии обладают и рядом отрицательных особенностей, которые необходимо учитывать, как при проектировании, так и при производстве. Сварочные технологии существенно воздействуют на исходные свойства материала и неоднородность его свойств в зоне сварных соединений. Эти особенности оказывают существенное влияние на характер распределения напряжений в сварных конструкциях в зависимости от прикладываемых нагрузок и сопротивляемости их эксплуатационным воздействиям, в конечном счете, влияя на надежность изделий.

При проектировании сварной конструкции необходимо учитывать следующие факторы:

- число сварных соединений в узле должно быть наименьшим. Рекомендуется шире использовать детали из листового и фасонного проката;

- конструкция и габариты сварного изделия должны позволять проведение термической обработки, которая часто необходима для повышения прочности и удаления внутренних остаточных напряжений, причем, наиболее прогрессивными способами и на стандартном оборудовании;

- необходимо использовать наиболее работоспособные и удобно выполняемые типы соединений. Их расположение должно уменьшать вероятность возникновения сварочных деформаций;

- следует избегать перекрещивание сварных швов, что может привести к концентрации напряжений и хрупкому разрушению;

- параллельно с конструкцией необходимо проектировать технологические процессы ее изготовления, предусматривая комплексную механизацию и автоматизацию процесса, и наиболее прогрессивные способы сварки.

Рациональная сварная конструкция должна удовлетворять следующим основным требованиям: необходимая надежность; минимальное количество деталей и простота их формы; минимальный объем сварочных работ, особенно в напряженных узлах; рациональность и удобство выполнения сварных соединений, а также контроля их качества; простота изготовления, минимальные масса и стоимость; транспортабельность; эстетичность и энергоэкономичность. Область применения основных видов сварки для легких конструкционных материалов представлена в таблице 4.1.

Конструкция изделия должна допускать возможность применения рациональной последовательности сварки, сводящей к минимуму образование сварочных деформаций узла. Нерациональная сварная конструкция не может быть улучшена за счет повышения качества сварных соединений. Разработка технологического процесса сварки ведется с учетом специфических особенностей изготавливаемой конструкции и требований к качеству сварных швов. Сюда же включаются разработка и создание *оборудования*, оснастки, инструмента и контрольно-измерительной аппаратуры. При этом следует помнить, что в общем объеме сварочных работ на современном производстве аэрокосмических конструкций большая доля приходится на механизированные способы сварки.

Таблица 4.1 Область применения основных видов сварки

Вид сварки	Способ сварки	Тип конструкции деталей и узлов	Материал	Толщина, мм
Дуговая сварка в среде инертных газов (аргона, гелия и смесей газов) неплавящимся электродом	Ручная	С короткими и криволинейными швами во всех пространственных положениях и труднодоступных местах	Низколегированные, коррозионно-стойкие и жаропрочные стали и сплавы, титановые, алюминиевые и магниевые сплавы	0,6 и выше
	Автоматическая: импульсной и непрерывной дугой погруженным электродом	С прямолинейными (более 100 мм), кольцевыми и круговыми швами	Алюминиевые и титановые сплавы	0,1-3 0,5-3
	погруженным электродом		Алюминиевые, магниевые и титановые сплавы	10-20
	трехфазной дугой		Алюминиевые сплавы	5-20
	сжатой дугой (плазменная сварка)		Титановые сплавы	0,5-16
	по активирующему флюсу		Титановые сплавы	1-12
	в контролируемой атмосфере	С недоступной защитой обратной стороны шва	Титановые сплавы	0,5 и выше
Дуговая сварка в среде защитных газов плавящимся электродом	Автоматическая в инертных газах	С прямолинейными (более 100 мм) и кольцевыми швами	Титановые и алюминиевые сплавы	1,0 и выше
	Полуавтоматическая в инертных газах	С короткими и криволинейными швами	Алюминиевые и магниевые сплавы	5 и выше
Контактная точечная сварка	Двусторонняя	Не требующие герметичности, с подходом электродов к месту сварки с двух сторон	Титановые, алюминиевые и магниевые сплавы	До 7

Окончание табл. 4.1.

Вид сварки	Способ сварки	Тип конструкции деталей и узлов	Материал	Толщина, мм
Контактная шовная сварка	Автоматическая	С плотнопрочными швами и двусторонним подходом роликов к месту сварки	Титановые, алюминиевые и магниевые сплавы	До 4
Контактная стыковая сварка	Автоматическая	Профильные конструкции, кольцевые заготовки, стрингеры и др.	Алюминиевые сплавы	Сечение до 1000 мм ²

Технологичность сварной конструкции во многом определяется выбором рациональной конструктивной схемы соединения, типом соединения, свариваемостью материала и методом сварки. Высокие технологические и экономические *показатели изготовления сварных* конструкций зависят от правильного выбора вида сварки. Выбор во многом зависит от толщины металла, его химического состава, вида соединения. Правильно выбранный вид сварки гарантирует не только качество и эффективность выполнения конкретных сварных соединений, но сказывается на техническом уровне производства сварных изделий, их работоспособности и долговечности. Выбирают его сравнением технических и экономических показателей, полученных при сварке конкретных соединений различными способами. Предпочтение отдают способу, который обеспечивает получение сварного соединения с заданными параметрами качества при наименьших затратах.

При сварке плавлением легких конструкционных металлов преимущественно используются стыковые соединения. Хотя соединения внахлестку и в тавр более просты для сборки, но при их выполнении затруднена защита, особенно с обратной стороны шва, и они менее прочны, чем стыковые, особенно при вибрационных нагрузках. В связи с тем, что при сварке легких конструкционных

материалов прочность сварных соединений часто ниже, чем прочность основного металла, для получения сварных соединений, равнопрочных с основным металлом, сварку ведут по утолщенным кромкам. На рис. 4.1 показаны технологичные и нетехнологичные соединения, выполненные дуговой сваркой для алюминиевых и титановых сплавов.

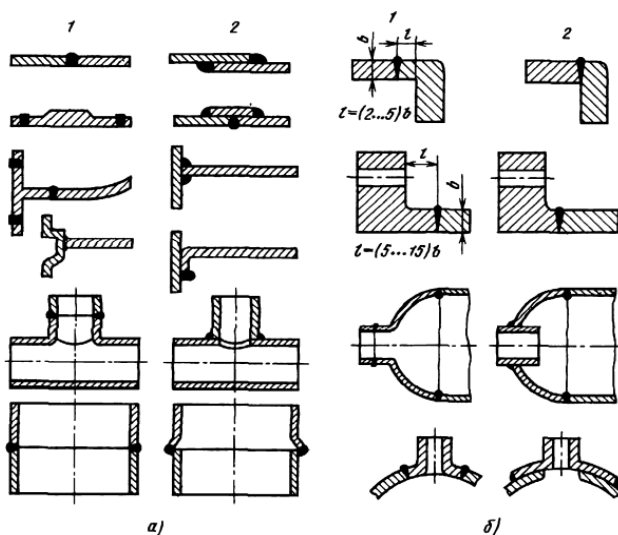


Рис. 4.1. Технологичные (1) и нетехнологичные (2) соединения при дуговой сварке: а – для алюминия, б – для титана




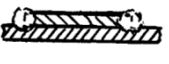




Повышение сопротивления усталости можно обеспечить снижением концентрации напряжений в сварных соединениях, а также благоприятным изменением поля остаточных напряжений. Минимальную концентрацию напряжений стремятся обеспечить как за счет рационального выбора типов соединений, методов и приемов сварки, так и путем устранения резких переходов от шва к основному металлу, механической зачисткой, электродуговой обработкой или нанесением покрытий.

Существующая нормативно-техническая документация кодирует все применяемые виды соединений и устанавливает требования к конструктивным элементам подготовленных кромок и сварных швов. В таблице 4.2 такие требования даются упрощенно.

Таблица 4.2 Виды применяемых соединений и требования к конструктивным элементам сварных швов

Эскиз соединения	Описание соединения	Свариваемые материалы	Толщина, мм	Наименование конструктивных узлов ЛА
	Соединение с односторонней сваркой	Титановые	0,5-3,0 (10)	Листовые конструкции (автоматич. сварка)
	Соединение с двухсторонней сваркой	Титановые	3,0-30,0	Обечайки, конусы, отсеки с кольцевыми швами
		Алюминиевые	4,0-16,0 (40)	
		Магниевые	Св. 6,0	
	Соединение с подкладкой	Титановые	До 60,0	Трубопроводы с кольцевыми швами; узлы крыла и оперения
		Алюминиевые	До 4,0	
		Магниевые	4,0-20,0	
	Соединение с замком	Стали разные	До 3,0; Св. 10,0	-
		Титановые	6,0-12,0	-
	Соединение с односторонней сваркой	Титановые	Св. 2,0	Сложной конфигурации (ручная сварка)
		Алюминиевые	Св. 3,0	
	Соединение с двухсторонней сваркой	Титановые	1,0-3,0	Панели, люки с жесткостями, емкости открытые
		Алюминиевые	До 10,0 (10...20)	
	Соединение с верхней проплавкой	Титановые	0,1-3,0	Разные конструкции из листа
	Соединение с внутренней проплавкой	Титановые	0,5-1,0	-
	Соединение с односторонней сваркой	Алюминиевые	До 3,0	Жесткости, емкости, разные тонкостенные конструкции
		Титановые	Св. 2,0	

Окончание табл. 4.2.

Эскиз соединения	Описание соединения	Свариваемые материалы	Толщина, мм	Наименование конструктивных узлов ЛА
	Соединение с односторонней сваркой	Алюминиевые	До 3,0	То же, герметичные
		Титановые	Св. 2,0	
	Соединение с двухсторонней сваркой	Алюминиевые	Св. 12,0	Разные сварные узлы
	Соединение стыковое	Титановые	0,5-1,0	Отсеки, емкости, корпуса с кольцевыми швами (автоматическая сварка)
		Алюминиевые	0,8-2,0	
	Соединение нахлесточное с односторонней сваркой	Титановые сплавы	До 3,0	Настил грузового пола, усиление панелей
	Нахлесточное соединение с проплавкой	Титановые	0,5-1,5	Силовые конструкции различной конфигурации
		Алюминиевые	2,0-0,6	
	Нахлесточное соединение с торцевой проплавкой	Алюминиевые сплавы	1,0-3,0	-
	Соединение точечной электросваркой	Алюминиевые	0,3-3,0	Балки, фермы, стойки, ребра жесткости, панельные конструкции, резервуары, обтекатели из листовых деталей, гнутых и пресованных профилей, как точечной, так и шовной сваркой
	Соединение точечной электросваркой	Титановые	Соотношение свариваемых толщин 3:1	-

Для уменьшения вероятности образования холодных трещин при сварке желательно полностью исключить геометрические концентраторы напряжений и по возможности максимально удалять сварные швы от концентратора. С этой же целью необходимо сводить к минимуму рихтовочные и правочные операции после сварки. В связи с высокой чувствительностью многих сплавов к концентрации напряжений при соединении разнотолщинных элементов необходимо со стороны более толстой кромки предусмотреть участок одинаковой толщины со вторым свариваемым элементом (рис. 4.2).

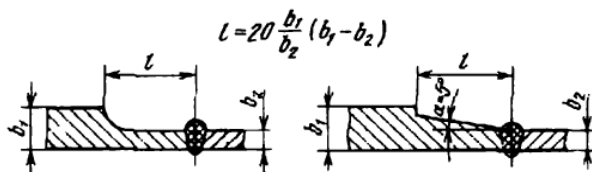


Рис. 4.2. Схема рационального выполнения сварного соединения металлов разных толщин

Возможность применения определенного вида сварки зависит от конструкции сварного изделия и технологических характеристик сварочного оборудования. Расположение сварного соединения, формы и размеры сварного изделия должны обеспечивать возможность подхода сварочной головки (горелки) к месту сварки.

Сопоставление пределов выносливости для разных типов соединений позволило сделать вывод о преимуществе сварных стыковых соединений по сравнению другими типами соединений (рис. 4.3). Так, пределы выносливости стыковых соединений, выполненных без дефектов, лишь незначительно отличаются от пределов выносливости основного металла.

Контактная точечная сварка широко используется в производстве аэрокосмических конструкций. Значителен и диапазон сварив-

ваемых толщин – от нескольких микронов до 10-30мм. Тип соединения-нахлесточное. В большинстве случаев применяют двустороннюю сварку, а при ограниченном доступе к месту сварки-одностороннюю. Для повышения производительности процесса и уменьшения коробления изделий используют многоточечную сварку. Материал деталей может быть одноименным и разноименным. Соединения, выполненные точечной сваркой, негерметичны. Они обеспечивают лишь необходимую прочность узла. Конструктивные элементы и размеры соединений, выполненных контактной точечной сваркой, регламентированы ГОСТ 15878-79.

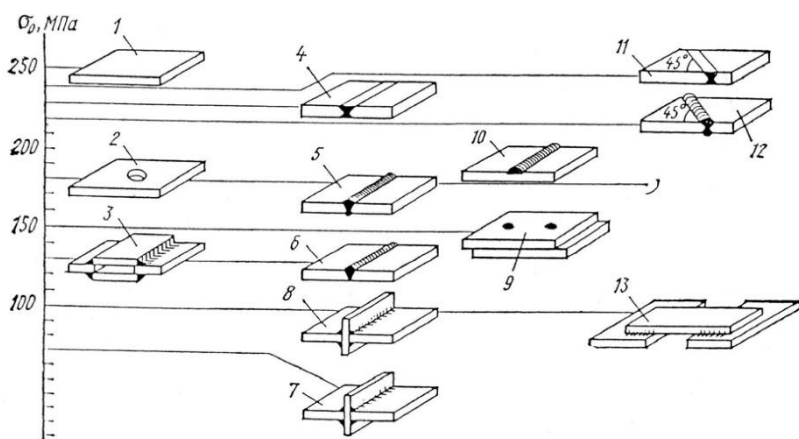


Рис.4.3. Сопоставление пределов выносливости для разных типов соединений:
 1 – цельная деталь; 2 – деталь с отверстием; 3 – деталь с фронтально нагруженным нахлесточным соединением; 4 – стыковой шов со снятым усилением; 5 – двухсторонний стыковой шов; 6 – односторонний стыковой шов; 7 – двухсторонний тавровый шов; 8 – односторонний тавровый шов; 9 – контактная точечная сварка; 10 – наплавка; 11 – косой стыковой шов со снятым усилением; 12 – двухсторонний косой стыковой шов; 13 – деталь с фланговонагруженным нахлесточным сварным соединением

Сварные соединения при точечной сварке могут быть рабочими и связующими. Связующие соединения не воспринимают рабочих нагрузок и служат для фиксации отдельных элементов конструкции относительно друг друга. Разрушение таких конструкций определяется прочностью несущего элемента. Рабочие соединения воспринимают и передают эксплуатационные нагрузки с одной детали узла на другую.

При конструировании сварного соединения важно обеспечить удобный подход электродов к месту сварки, чтобы детали могли быть сварены на стандартном оборудовании прямыми электродами. Конструкция изделия должна допускать возможность применения рациональной последовательности сварки, сводящей к минимуму образование сварочных деформаций узла.

Примеры точечной сварки профильных элементов различной трудности приведены на рис. 4.4. Обычно их разделяют на удобные, нормальные, неудобные, трудновыполнимые.

При проектировании сварочной конструкции необходимо учитывать возможности применяемого сварочного оборудования, которые ограничиваются техническими характеристиками машины: полезным вылетом электродов, их раствором и установочной высотой. Эти характеристики определяют максимальные габариты сварочного изделия. Стандартные машины для точечной сварки имеют полезный вылет электродов до 1,5 метров. Поэтому максимальная ширина плоской панели при точечной сварке не должна превышать двойного вылета электродов. Установочная высота электродов достигает 1 метр. Этот параметр ограничивает размеры деталей по высоте и диаметру. Технологические возможности сварочной машины могут быть расширены при установке электрододержателей различных типов и фигурных электродов (рис. 4.5)

Удобные	Нормальные	Неудобные	Трудновыполнимые
 $H=50\text{мм}$	 $H>50\text{мм}$	 $\alpha=60^\circ$ $H>50\text{мм}$	 $\alpha \geq 10^\circ$
 $B > 15\text{мм}$ $H \leq 50\text{мм}$	 $B = 15\text{мм}$ $H > 50\text{мм}$	 $B < 15\text{мм}$ $H > 50\text{мм}$	 $B \leq 10\text{мм}$
 $H \geq 2,5B$	 $H \geq 2B$	 $B < 100\text{мм}; H < 75\text{мм}$	 $B < 75\text{мм}; H < 50\text{мм}$
 $B > 15\text{мм}$	 $H > 50\text{мм}$	 $H = 2B$	 $B \leq 1,5B$
 $B \leq 15\text{мм}; R \leq 50\text{мм}$	 $B \leq 15\text{мм}$	 $B \leq 15\text{мм}$	 $B \leq 15\text{мм}; R \leq 50\text{мм}$

Рис. 4.4. Примеры сварных соединений различной трудности

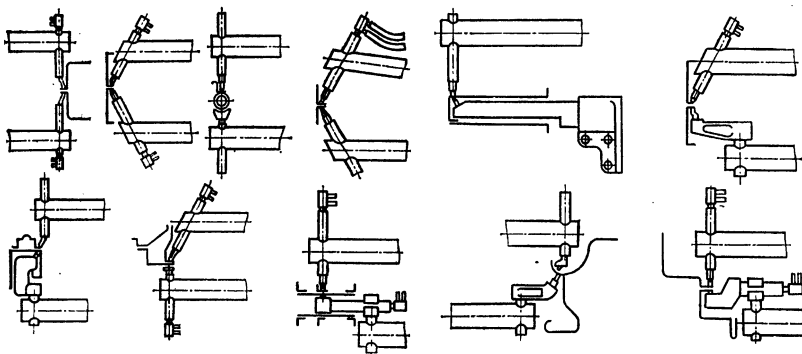


Рис. 4.5. Примеры установки электрододержателей различных типов для сварки в труднодоступных местах

Контрольные вопросы

1. Перечислите факторы, которые необходимо учитывать при проектировании сварной конструкции.
2. Назовите основные требования, которым должна удовлетворять рациональная сварная конструкция.
3. От каких факторов зависит возможность применения определенного вида сварки при производстве сварочной конструкции?
4. Какие факторы необходимо учитывать при конструировании сварного соединения под точечную сварку?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сварка в самолетостроении: учебник / Б.Е. Патон, Г.А. Кривов, В.Р. Рябов, А.Я. Ищенко [и др.]. – Киев: Издательство МИИВЦ, 1998. – 695 с.

2. Андрюшкин, А.Ю. Производство сварных конструкций в ракетно-космической технике: учебное пособие / А.Ю. Андрюшкин, О.О. Галинская, А.Б. Сигаев. – Санкт-Петербург: БГТУ «Военмех» им. Д.Ф. Устинова, 2015. – 104 с. – ISBN 978-5-85546-870-0.

3. Бурмистров, Е.Г. Основы сварки и газотермических процессов в судостроении и судоремонте: учебник / Е.Г. Бурмистров. – 3-е изд., стереотип. – Санкт-Петербург: Лань, 2020. – 552 с. – ISBN 978-5-8114-5234-7.

4. Ельцов, В.В. Технология сварки плавлением: учебное пособие / В.В. Ельцов. – Тольятти: ТГУ, 2019. – 180 с. – ISBN 978-5-8259-1277-6.

5. Зорин, Н.Е. Материаловедение сварки. Сварка плавлением: учебное пособие / Н.Е. Зорин, Е.Е. Зорин. – 3-е изд., стереотип. – Санкт-Петербург: Лань, 2018. – 164 с. – ISBN 978-5-8114-2156-5.

6. Козловский, С.Н. Введение в сварочные технологии: учебное пособие / С.Н. Козловский. – Санкт-Петербург: Лань, 2011. – 416 с. – ISBN 978-5-8114-1159-7.

Учебное издание

Вашуков Юрий Александрович

**ОСОБЕННОСТИ СВАРКИ
ЛЕГКИХ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Учебное пособие

Редактор И.П. Ведмидская
Компьютерная верстка И.П. Ведмидской

Подписано в печать 19.05.2022. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печ. л. 5,0.
Тираж 25 экз. Заказ . Арт. – 8(Р1У)/2022.

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ АКАДЕМИКА С.П. КОРОЛЕВА»
(САМАРСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)
443086, Самара, Московское шоссе, 34.

Издательство Самарского университета.
443086, Самара, Московское шоссе, 34.