

С.Ф. ДЕМИЧЕВ, А.В. РЯСНЫЙ, А.Л. УСОЛЬЦЕВ

**ОСНОВНЫЕ СПОСОБЫ
СВАРКИ
И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ
ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ УЗЛОВ
ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ
И ИХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

2007



САМАРА

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АЭРОКОСМИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ
имени академика С.П. КОРОЛЁВА»

С.Ф. ДЕМИЧЕВ, А.В. РЯСНЫЙ, А.Л. УСОЛЬЦЕВ

**ОСНОВНЫЕ СПОСОБЫ СВАРКИ И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ПРИ
ИЗГОТОВЛЕНИИ УЗЛОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ И
ИХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

*Утверждено Редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия*

САМАРА
Издательство СГАУ
2007

УДК 621.791 (075)
ББК 59.47



Инновационная образовательная программа «Развитие центра компетенции и подготовка специалистов мирового уровня в области аэрокосмических и геоинформационных технологий»

Авторы: *Демичев С.Ф., Рясный А.В., Усольцев А.Л.*

Рецензенты: проф., д-р физ.– мат. наук СамГУ Покоев А.В.,
проф., канд. техн. наук СГАУ Заббаров А.И.

Д 307 *Демичев, С.Ф. Основные способы сварки и их применение при изготовлении узлов летательных аппаратов и их двигателей: учеб. пособие / С.Ф. Демичев, А.В. Рясный, А.Л. Усольцев. - Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2007. - 73 с.*

ISBN 978 – 5 – 7883 – 0609 – 4

Освещены современные теоретические представления о процессе формирования соединения при сварке. Изложены сведения о физической сущности, технологических особенностях и областях рационального использования основных способов сварки плавлением и давлением. Приведены примеры применения сварки при изготовлении неразъемных узлов и конструкций летательных аппаратов.

Учебное пособие предназначено для студентов очной и очно-заочной форм обучения факультетов летательных аппаратов, двигателей летательных аппаратов и инженерно-технологического.

УДК 621.791 (075)
ББК 59.47

ISBN 978 – 5 – 7883 – 0609 – 4 © Демичев С.Ф., Рясный А.В., Усольцев А.Л.
© Самарский государственный
аэрокосмический университет, 2007

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. Физические основы и классификация процессов сварки	5
2. Сварка давлением. Основные способы сварки и их особенности	9
2.1. Особенности формирования соединений при сварке давлением	9
2.2. Электрическая контактная сварка	12
2.3. Сварка взрывом	18
2.4. Магнитно-импульсная сварка	21
2.5. Холодная сварка	22
2.6. Сварка трением	24
2.7. Ультразвуковая сварка	26
2.8. Диффузионная сварка в вакууме	28
3. Сварка плавлением. Основные способы сварки и их особенности	32
3.1. Особенности формирования соединений при сварке плавлением	32
3.2. Дуговые виды сварки	33
3.2.1. Электрическая дуга и ее свойства	33
3.2.2. Источники питания сварочной дуги	36
3.2.3. Ручная дуговая сварка	37
3.2.4. Автоматическая дуговая сварка под флюсом	39
3.2.5. Дуговая сварка в защитных газах	41
3.3. Электронно-лучевая сварка	47
4. Конструктивно-технологические характеристики сварных соединений	48
5. Изготовление сварных узлов и конструкций авиационно-космической техники	52
5.1. Сборка-сварка корпусов летательных аппаратов	52
5.2. Сборка-сварка баков-емкостей летательных аппаратов	58
5.3. Сварка узлов авиационных газотурбинных двигателей	68
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	72

ВВЕДЕНИЕ

Производство современных летательных аппаратов (ЛА) и их двигателей невозможно без использования неразъемных соединений, получаемых различными способами сварки. По ряду важнейших конструктивно-технологических показателей сварные соединения имеют преимущества по сравнению с другими видами соединений (клепаными, клеевыми, резьбовыми и др.), применяемыми сегодня в производстве. Важнейшим преимуществом сварки является возможность получения герметичных и высокоресурсных соединений, работающих в условиях различных сред, в том числе в вакууме. Сварные соединения, особенно стыковые, как правило, имеют лучшие массо-габаритные характеристики. При изготовлении некоторых узлов и агрегатов ЛА и их двигателей (переходников, компенсаторов и т.п.) с помощью сварки можно получить соединения из разнородных материалов (алюминиевые сплавы со сталями, титановыми сплавами и металлокерамикой, керамика с керамикой, сталями, сплавами и т.д.).

Трудоёмкость получения сварных соединений чаще ниже, чем клепаных, поскольку отпадает необходимость изготовления дополнительных соединительных элементов (накладок, фитингов и т.п.), характерных для клепаных конструкций. Многие способы сварки, используемые в производстве ЛА, достаточно просто поддаются механизации, автоматизации и роботизации, что является важным критерием для надежности обеспечения качества соединений, а также повышения производительности процесса изготовления узлов и агрегатов.

Наряду с явными преимуществами по сравнению с другими видами соединений сварка имеет и свои недостатки. Во-первых, при сварке материалы конструкций должны иметь хорошую свариваемость. Во-вторых, возникают трудности при автоматизации процессов сварки для конструкций ЛА, имеющих сложную аэродинамическую форму (пассажирские, транспортные самолеты и т.п.).

Существующие в настоящее время многочисленные способы сварки позволяют успешно решать самые сложные задачи в сфере производства неразъемных соединений. Это обстоятельство обуславливает их широкое применение в производстве ЛА. На-

пример, в ракетоносителях (РН) основными агрегатами и их элементами, изготавливаемыми сваркой, являются: баки для горючего и окислителя первой, второй и третьей ступеней; тоннельные и магистральные трубопроводы; арматура баков; ферменные конструкции переходных отсеков и устройств крепления маршевых двигателей; цилиндрические и шаровые баллоны для рабочих тел систем управления; элементы крепления приборов (кронштейны, фермы, рамы, этажерки и т.п.).

Различные технологические процессы сварки находят широкое применение при производстве ЛА типа искусственных спутников Земли, межпланетных станций, космических кораблей и орбитальных станций.

В самолетостроении сварка применяется для изготовления многих важнейших агрегатов: элементов фюзеляжа, крыла, баков, трубопроводов, шасси, сотовых панелей, в которых используются высокопрочные, жаростойкие стали, титановые и алюминиевые сплавы.

Задача создания высококачественных изделий требует от конструкторов и технологов знания технологических возможностей современных способов сварки и умения использовать их при решении практических задач.

1. Физические основы и классификация процессов сварки

В соответствии с ГОСТ 2601-84 сваркой называется технологический процесс изготовления неразъемных соединений посредством установления межатомных связей между свариваемыми частями изделия при их местном или общем нагреве, или пластическом деформировании, или совместном действии нагрева и пластического деформирования.

Как следует из определения, в основе любого способа сварки лежат процессы по созданию условий, при которых образуются межатомные связи на границе раздела соединяемых элементов.

В зависимости от природы соединяемых тел возможно образование трех основных типов связей: ковалентной, металлической, ионной. Кроме того, в твердых телах существует молекулярная связь Ван-дер-Ваальса. Она обусловлена явлением поляриза-

ции, при котором электроны в сближаемых атомах начинают двигаться согласованно.

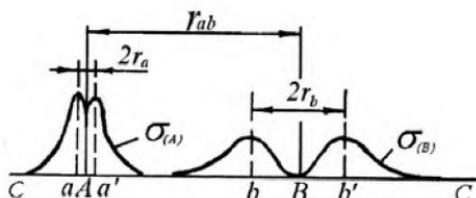


Рис. 1. Распределение плотности электронной энергии при сближаемых атомах А и В

валентных электронов начинают перекрываться и они вступают во взаимодействие. При этом изменение потенциальной энергии взаимодействия представлено на рис. 2. На расстоянии r_1 между атомами устанавливаются молекулярные связи Ван-дер-Ваальса, что соответствует минимуму потенциальной энергии на кривой II. Дальнейшее взаимодействие связано с необходимостью введения энергии (активации) в систему, что приводит к изменению потенциальной энергии, соответствующее перемещению точки 1 кривой II в точку 2 пересечения с кривой I. В данном возбужденном состоянии возникают предпосылки образования химической связи того или иного типа в зависимости от природы атомов. При этом происходит самопроизвольное выделение энергии и её рассеяние, а система приобретает минимум потенциальной энергии, соответствующий

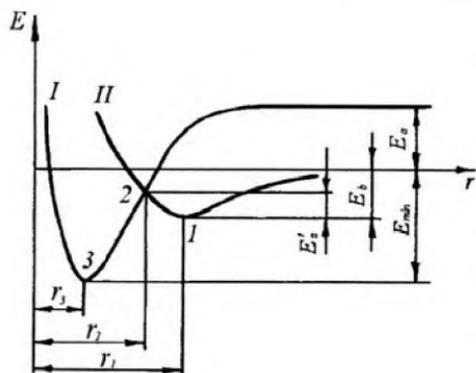


Рис. 2. Изменение потенциальной энергии при сближении ювенильных поверхностей

На рис.1 показана схема взаимодействия двух атомов А и В, где σ - плотность электронной энергии каждого из атомов; r_A и r_B - расстояния, на которых наиболее вероятно пребывание электрона каждого атома. При сближении атомов волновые функции валентных электронов начинают перекрываться и они вступают во

взаимодействие. При этом изменение потенциальной энергии взаимодействия представлено на рис. 2. На расстоянии r_1 между атомами устанавливаются молекулярные связи Ван-дер-Ваальса, что соответствует минимуму потенциальной энергии на кривой II. Дальнейшее взаимодействие связано с необходимостью введения энергии (активации) в систему, что приводит к изменению потенциальной энергии, соответствующее перемещению точки 1 кривой II в точку 2 пересечения с кривой I. В данном возбужденном состоянии возникают предпосылки образования химической связи того или иного типа в зависимости от природы атомов. При этом происходит самопроизвольное выделение энергии и её рассеяние, а система приобретает минимум потенциальной энергии, соответствующий

точке 3 на кривой I. Необходимо отметить, что прочность Ван-дер-Ваальсовой связи (E_1) 0,84...8,4 кДж/моль, в то время как энергия химической связи (E_3) лежит в пределах 84...840 кДж/моль. Энергия E_a называется энергией активации процесса образования химических связей.

Большинство металлов образует простые симметричные решетки - куб,

центрированный куб, гранецентрированный куб, гексагональную плотноупакованную решетку, однако некоторые металлы (галлий, индий, германий) имеют особо сложное кристаллическое строение. Энергетические спектры внутренних атомов кристалла взаимно уравновешены. Спектры наружных атомов кристалла не уравновешены. Они образуют силовое поле с повышенной потенциальной энергией. Следовательно, поверхность металла обладает дополнительной энергией, которая называется поверхностной энергией.

Строение реальной металлической поверхности весьма сложно и в значительной степени отличается от идеальной - ювенильной поверхности. Вследствие высокой активности поверхностных слоев металла поверхность всегда покрыта окислами, жидкими и газовыми пленками. Ювенильная поверхность может существовать очень короткие промежутки времени, например, в изломе металлов при совместном деформировании или после его механической обработки.

На воздухе микровыступы и впадины поверхности многих металлов, кроме так называемых благородных (золото, платина и др.), мгновенно покрываются пленками окислов, а также слоями адсорбированных молекул газа, воды и жировых веществ. Толщина и последовательность расположения таких пленок может быть различной. Непосредственно на поверхности металла обычно находится пленка окислов.

Кроме наличия на поверхности различного рода пленок, строение реальной поверхности характеризуется её геометрией. Геометрия реальной металлической поверхности определяется её волнистостью. Волнистость характеризует геометрию поверхности в макроскопическом, а шероховатость - в микроскопическом масштабе. Нужно также отметить ультрамикронеровности. Шероховатости могут быть весьма разнообразны по высоте микровыступов и расстоянию между их вершинами. Вследствие наличия главным образом микронеровностей действительная площадь поверхностей металлов во много раз меньше площади, измеренной обычными методами.

Таким образом, соединение реальных твердых тел при сварке затрудняется рядом обстоятельств. Во-первых, реальные твердые тела поликристаллические; во-вторых, их поверхности имеют сложную форму и покрыты различными пленками. Поэтому образование прочного соединения возможно лишь при условии удале-

ния из зоны соединения загрязнений и обеспечения сплошного физического контакта по соединяемым поверхностям. В реальных условиях для формирования неразъемного соединения необходимо затратить энергию не только на активацию поверхностных атомов, но и на очистку поверхностей в зоне соединения и формирование сплошного физического контакта.

Исходя из изложенного выше, сварку можно отнести к классу так называемых топохимических реакций. Формирование прочного сварного соединения осуществляется в три стадии. На первой стадии развивается физический контакт, на второй стадии образуются химические связи на микроучастках, на третьей стадии процесс сварки завершается диффузией. Причем диффузионные процессы развиваются почти одновременно с прорастанием дислокаций при пластическом деформировании, либо при наличии высокой температуры.

В зоне сварки можно установить наличие двух основных явлений, связанных с термодинамически необратимым изменением формы энергии и состояния вещества (рис.3.). К первому можно отнести введение и преобразование энергии, ко второму - превращения вещества. Термодинамическое определение процесса сварки звучит следующим образом: сварка - это процесс получения монолитного соединения материалов за счет термодинамически необратимого превращения тепловой, механической энергии и вещества в стыке.



Рис. 3. Классификация процессов сварки

Склеивание, цементирование и другие соединительные процессы, обеспечивающие монолитность соединения, в отличие от сварки и пайки, как правило, не требуют специальных источников

энергии и реализуются только за счет введения и преобразования вещества (клея, цемента и т.д.).

На основе анализа термодинамических превращений все процессы сварки классифицируются по физическим признакам: виду энергии, используемой для образования сварного соединения и состоянию вещества. По состоянию вещества все способы разделяются на сварку в жидкой фазе и сварку в твердой фазе (сварку плавлением и сварку давлением). По виду использованной энергии различают три класса сварки: термический (Т), термомеханический (ТМ) и механический (М). Причем процессы сварки термического класса, как правило, относятся к сварке плавлением, а термомеханического и механического - к сварке давлением.

Процессы сварки классифицируются и по ряду других признаков. По виду источника энергии: дуговая, плазменная, электронно-лучевая, контактная, диффузионная, ультразвуковая, сварка трением и др. По способу защиты металла в зоне сварки: в защитных газах, в вакууме, под флюсом. По непрерывности процесса: непрерывные и импульсные способы. По степени механизации: ручная, полуавтоматическая, автоматическая, с использованием роботов. По роду сварочного тока: переменный, постоянный. По виду электрода: плавящийся, неплавящийся и т.д.

2. Сварка давлением. Основные способы сварки и их особенности

2.1. Особенности формирования соединений при сварке давлением

Применение механической энергии при сварке давлением позволяет реализовать целый ряд преимуществ при формировании соединений по сравнению со сваркой плавлением. Эти преимущества определяются, в первую очередь, тем, что механическая энергия гораздо менее инерционна, чем тепловая, а при ударно-импульсных нагрузках вообще безинерционна. При этом отсутствуют недостатки, связанные с достаточно длительным термическим воздействием на свариваемые материалы при сварке плавлением: литая структура металла шва, значительные размеры зоны термического влияния, остаточные напряжения и деформации и др. В связи с этим способы сварки давлением являются перспективными для

получения высокопрочных и надежных неразъемных соединений в производстве ЛА.

По современным представлениям процесс образования соединения при любых способах сварки без расплавления рассматривается как процесс, протекающий в три стадии.

1. Образование физического контакта, т.е. сближение атомов соединяемых материалов за счет пластической деформации на расстоянии, при котором становится возможным квантово-механическое взаимодействие электронных оболочек поверхностных атомов.
2. Активация контактных поверхностей (образование активных центров). Активация контактных поверхностей начинается уже в процессе их сближения при смятии отдельных микровыступов за счет совместной пластической деформации.
3. Объемное взаимодействие. Эта стадия наступает с момента образования активных центров на соединяемых поверхностях. В течение третьей стадии происходит развитие взаимодействия соединяемых материалов как в плоскости контакта с образованием прочных связей, так и в объеме зоны контакта. Для обеспечения требуемой прочности соединений часто необходимо дальнейшее развитие процессов рекристаллизации или диффузии.

Известно, что реальные металлические поверхности имеют сложное геометрическое и физическое строение. На первой стадии формирования соединений при сварке давлением реализуются процессы по развитию максимальной площади фактического контакта и очистки поверхностей от окислов и адгезионных наслоений.

Каждый процесс сварки давлением может обеспечить высокое качество соединения в том случае, когда все оксидные и адсорбционные наслоения в плоскости контакта в процессе плавления растворяются в расплаве или полностью выдавливаются из плоскости свариваемого контакта при операции осадки.

Первое условие полностью соблюдается при контактной точечной и шовной сварке, второе условие выполняется при контактной стыковой, холодной, ультразвуковой и сварке трением.

Особый характер имеет очистка поверхностей при сварке взрывом и диффузионной сварке в вакууме. При сварке взрывом поверхности очищаются воздушно-плазменной кумулятивной струей. При диффузионной сварке в вакууме в зависимости от сварив-

ваемых сочетаний материалов могут реализоваться различные механизмы удаления оксидных слоев: диссоциация, растворение, восстановление и другие.

Активация контакта (вторая стадия) - это процесс преднамеренного повышения энергии в поверхностных слоях или по плоскости контакта, или, дополнительно к этому, в некотором объеме металла вокруг контакта. Энергия активации может быть получена за счет любого физического процесса. Механическая энергия, вводимая в свариваемый контакт, весьма универсальна и безинерционна по сравнению с тепловой, что имеет весьма важное значение.

Все процессы сварки давлением отличаются друг от друга временной программой осадки. Можно выделить следующие процессы осадки:

- длительно действующие при постоянном давлении (диффузионная сварка);
- ударно-импульсные (сварка взрывом, магнитно-импульсная сварка);
- специально запрограммированные по силе сдавливания и времени её действия (контактная, холодная, трением, ультразвуковая, диффузионная).

На третьей стадии процесса сварки давлением развиваются процессы взаимной диффузии, рекристаллизации, в отдельных случаях образования химических соединений (интерметаллидов, карбидов и т.п.), формируется напряженное состояние в зоне сварки.

Важную роль в получении качественных сварных соединений играют процессы образования химических соединений при сварке разнородных материалов. Так, например, в системе Cu-Al могут образовываться интерметаллиды трех видов CuAl_2 , CuAl , Cu_2Al_3 . Зависимость величины интерметаллидной фазы (y) от времени t может быть описана известным уравнением $y^n = k(t+t_0)$, где t_0 - общий латентный период образования зародышей интерметаллида; k - коэффициент роста интерметаллида, n - экспериментально определяемый показатель степени.

Качество сварного соединения в значительной степени зависит от толщины интерметаллической прослойки, возникающей в контакте. При критических толщинах (десятки микрон) прочность сварных соединений резко падает. В связи с этим возникает необходимость предотвращения появления и роста интерметаллических

прослойк. Основными направлениями для ограничения образования и роста интерметаллических соединений являются: оптимизация режимов сварки; применение специальных "барьерных" прослойк.

Барьерные прослойки должны изготавливаться из металлов, хорошо растворимых с основными металлами. Барьерные прослойки могут состоять из одного или нескольких слоев. Например, при диффузионной сварке титановых сплавов со сталями используют прослойку, состоящую из ванадия, меди, никеля.

2.2. Электрическая контактная сварка

Электрическая контактная сварка относится к одному из наиболее распространенных видов сварки. Этим способом сваривают до 30% всех сварных изделий.

Все способы контактной сварки, основные из которых точечная, шовная, стыковая, объединяет то, что для формирования соединений используются различные программируемые сочетания электрической и механической энергии. Причем электрическая энергия вводится в контакт между деталями путем пропускания через него сварочного тока, а механическая - путем сдавливания и пластического деформирования материала в зоне сварки.

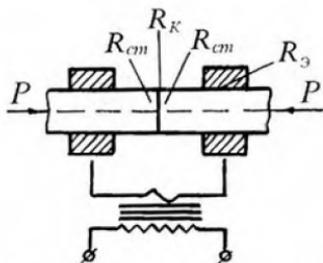


Рис. 4. Схема нагрева при стыковой сварке

Стыковая контактная сварка - сварка, при которой соединение свариваемых частей происходит по поверхности стыкуемых торцов (рис. 4).

Свариваемые детали соосно закрепляются в зажимах сварочной машины, являющихся одновременно токоподводами. Применение понижающего трансформатора обеспечивает получение больших токов в сварочной цепи.

При сварке теплота, частично или полностью используемая на полезный нагрев, выделяется в контакте между торцами свариваемых стержней за счет контактного сопротивления R_k и в самих стержнях с собственным сопротивлением $R_{ст}$. Контактным сопротивлением между электродами и свариваемыми стержнями $R_э$ можно пренебречь, так как оно относительно мало и выделяемая на нем теплота практически не сказывается на нагреве зоны сварки. Нали-

чие контактного сопротивления и отвода тепла в токоподводящие устройства обеспечивают преобладающий нагрев приконтактных областей соединения.

Основные параметры режима стыковой сварки: сила тока и его плотность, время пропускания тока, усилие сжатия.

Получили распространение способы стыковой сварки сопротивлением и оплавлением. При сварке сопротивлением стык деталей, плотно сжатых осевой силой, нагревается током до температур, меньших температуры плавления. В процессе последующей осадки они пластически деформируются и свариваются. Сваркой сопротивлением трудно добиться равномерного нагрева детали по всему сечению; при этом не обеспечивается полное удаление окисных пленок из стыка, поэтому она используется ограниченно для изделий относительно небольшого сечения (до 200 – 300 мм²).

Сварку оплавлением подразделяют на сварку непрерывным оплавлением и оплавлением с подогревом. Сварка оплавлением начинается с медленного сближения до соприкосновения торцов при включенном сварочном трансформаторе, но без сдавливания их заметной силой. В момент касания торцов между ними образуется контакт, электрическое сопротивление которого из-за отсутствия сжимающих сил относительно велико. При протекании через такой контакт сварочного тока выделяется большое количество теплоты, и окружающий его металл почти мгновенно плавится, образуя между торцами деталей жидкие перемычки. При дальнейшем нагреве током перемычки взрываются. Это приводит к выбрасыванию из зазора между торцами частиц металла в виде искр и некоторому укорочению деталей. При постепенном их сближении образуются все новые контакты и перемычки, что приводит к интенсивному нагреву контактирующих концов деталей. После образования на торцах сплошного слоя расплавленного металла и достаточного прогрева деталей по длине они сдавливаются осевой силой (осаживаются). При этом расплавленный металл вытесняется из зазора, а расположенный под ним чистый, хорошо разогретый металл пластически деформируется и сваривается.

При сварке оплавлением с подогревом детали предварительно подогреваются методом сопротивления в процессе кратковременных замыканий их торцов, а затем оплавляются. Сварка оплавлением используется при изготовлении конструкций как малых, так и больших сечений (до 100000 мм²).

Стыковая сварка в настоящее время применяется для изготовления деталей из сталей, алюминиевых, титановых, медных сплавов и некоторых тугоплавких металлов. Например, в производстве ЛА стыковая контактная сварка используется для изготовления шпангоутов больших размеров, соединения отдельных секций герметичных отсеков ракет и т.д. Ею можно соединять детали как с компактными, так и развитыми, сложными сечениями.

Контактная точечная сварка - один из высокопроизводительных способов контактной сварки, при котором соединение получается между торцами электродов, подводящих ток и передающих силу сжатия. Контактная точечная сварка выполняется на специальных машинах (рис. 5).

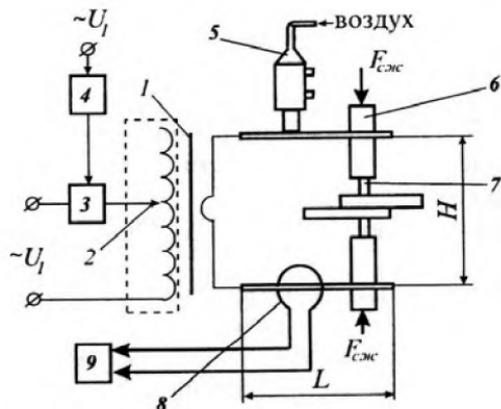


Рис. 5. Функциональная схема сварочной машины МТП-75-9

Машина состоит из сварочного трансформатора 1, переключателя ступеней трансформатора 2, прерывателя сварочного тока 3, регулятора времени 4, механизма сжатия деталей 5, электрододержателей 6 и электродов 7, датчика сварочного тока 8, прибора для измерения сварочного тока 9.

Основными параметрами режима точечной сварки являются: диаметр рабочей поверхности электродов $d_{\text{э}}$, сила сжатия деталей $F_{\text{сж}}$, сила сварочного тока $I_{\text{св}}$, продолжительность его включения $t_{\text{св}}$.

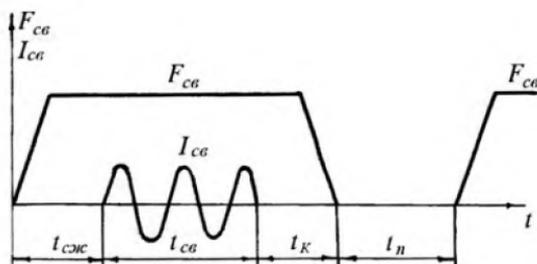


Рис. 6. Циклограмма точечной сварки

Продолжительность отдельных составляющих цикла сварки (рис. 6) - предварительное сжатие $t_{\text{сжс}}$, сварка $t_{\text{св}}$, проковка $t_{\text{к}}$ и пауза $t_{\text{н}}$ - задаются настройкой регулятора времени.

На первой стадии сварки происходит смятие микровыступов и формируется предварительный (механический) контакт между соединяемыми поверхностями, характеризующийся определенным контактным сопротивлением. На втором этапе – нагрев и расплавление металла в зоне соединения (образование т.н. литого ядра) с одновременным формированием уплотняющего пояска по его периферии. На третьем этапе после выключения тока расплавленный металл литого ядра кристаллизуется в условиях продолжающегося действия сварочного давления, что обеспечивает получение плотной структуры сварной точки. Такая схема процесса сварки обеспечивает высокое качество и исключает дефекты, например, несплошности и выплески жидкого металла.

Важными условиями получения качественных соединений являются образование литого ядра определенной формы и размеров, а также предотвращение выплесков расплавленного металла из него. ГОСТ 15878-79 устанавливает следующие конструктивные элементы соединений, выполненных контактной точечной сваркой (рис. 7): S и S_1 – толщина детали, d – расчетный диаметр литого ядра точки; h и h_1 – величина проплавления; g и g_1 – глубину вмятины.

Расстояние от центра точки до края нахлестки должно быть не менее половины минимальной величины нахлестки. Величина проплавления h , h_1 должна быть от 20 до 80% толщины деталей. Глубина вмятины g , g_1 не должна быть более 20% толщины деталей. Диаметр рабочей поверхности электрода $d_э$ обычно близок к расчетному диаметру литого ядра точки d .

Соединения, выполненные контактной точечной сваркой, согласно ГОСТ испытываются на срез или на отрыв. Циклограммы контактной точечной сварки могут быть разнообразными.

Рассмотрим в качестве примера полный цикл свароч-

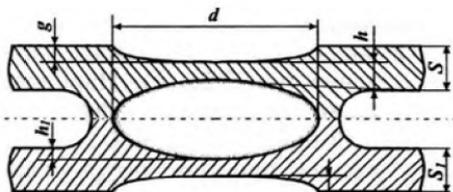


Рис. 7. Конструктивные элементы соединения, выполненного контактной сваркой

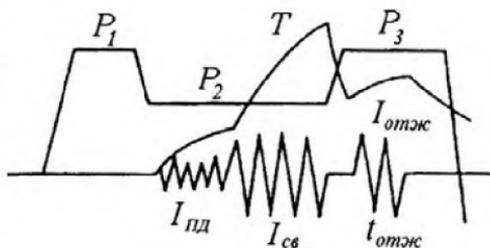


Рис. 8. Типовой цикл точечной сварки

ного процесса с программированным изменением давления и тока. Цикл (рис. 8) начинается с того, что электроды сжимают детали силой P_1 в 1,5...2 раза большей, чем это предусматривается режимом сварки. Такого рода предварительное обжатие деталей весьма желательно при сварке крупногабаритных и тяжелых конструкций, которые обладают некоторой собственной конструктивной упругостью или жесткостью. Через некоторый момент времени повышенное давление уменьшается до режимного, сварочного P_2 , и в тот же момент включается ток подогрева контакта $I_{по}$, переходящий затем в сварочный ток $I_{св}$ в 1,5...2 раза больший, чем подогревающий. Если свариваемые детали оказались способными принять нежелательную сильную закалку, её снимают отжигающим током $I_{отж}$. При таком цикле переменными являются не только амплитуды или действующие значения токов, но и все параметры времени.

Разновидностью контактной точечной сварки является **рельефная сварка**. Сварка в данном случае происходит по предварительно подготовленным в металлических изделиях выступам

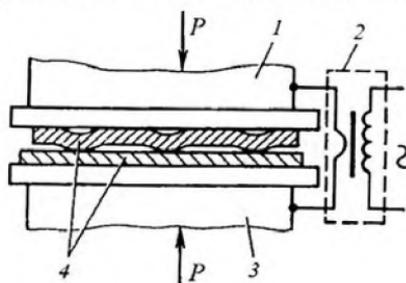


Рис. 9. Схема рельефной сварки
1, 3 – верхний и нижний плоские электроды; 2 – сварочный трансформатор; 4 – детали

(рис. 9). Первоначальный контакт деталей осуществляется по ограниченной рельефами площади. Форма выступов в сечении может быть, например, в виде полукруга или трапеции. Наличие рельефа дает возможность обеспечивать концентрированный нагрев в месте контакта при больших плотностях тока. В дальнейшем выступы под давлением P электродов постепенно деформируются. На определен-

ной стадии происходят плавление металла и образование соединения по всему контуру рельефа. Обычно на поверхности деталей выполняется несколько рельефов или один выступ замкнутой формы в виде кольца. В первом случае детали соединяются одновременно в нескольких точках, во втором образуется непрерывный герметичный шов (контурная рельефная сварка). Рельефная сварка применяется для деталей небольших размеров из-за значительной потребляемой мощности.

Шовная сварка обеспечивает соединение элементов внахлестку вращающимися дисковыми электродами в виде непрерыв-

ного или прерывистого шва (рис. 10). В зависимости от характера вращения роликов различают непрерывную и шаговую (прерывистую) шовную сварку.

При непрерывной сварке ток подается при вращающихся роликах непрерывно или в виде импульсов при постоянном давлении на электродах.

Импульсная подача тока (рис. 11 а) во многих случаях является более оптимальной. Точка образуется в этом случае при прохождении каждого отдельного импульса. Перемещение свариваемых деталей и частота импульсов выбираются так, чтобы точки перекрывали друг друга на 30...50%, тогда соединение получится плотным. При большой скорости перемещения деталей и малой частоте импульсов можно получить прочные, но не герметичные швы, аналогичные швам, полученным точечной сваркой.

При сварке некоторых материалов и прежде всего алюминиевых сплавов рекомендуется шаговая (прерывистая) сварка (рис. 11 б, в). Она заключается в том, что в период подачи сварочного тока дисковые электроды (ролики) неподвижны относительно изделия, а перемещение изделия происходит вследствие периодического поворота электродов на небольшой угол в паузах между импульсами тока. Такой режим сварки ускоряет кри-

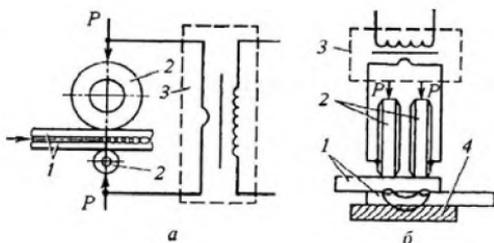


Рис. 10. Схема шовной сварки:
а - двусторонняя; б - односторонняя;
1 - свариваемые детали; 2 - сварочные ролики;
3 - сварочный трансформатор; 4 - медная подкладка

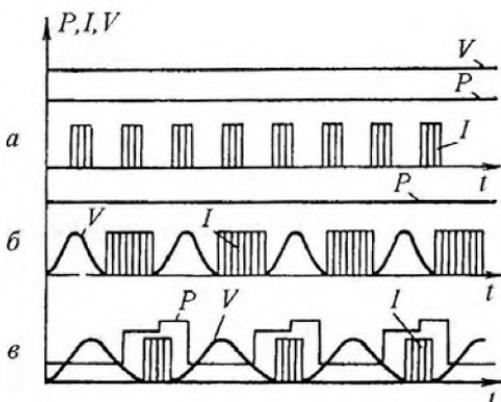


Рис. 11. График скорости перемещения деталей V , силы P и сварочного тока I при шовной сварке: а - импульсная; постоянная сила и непрерывное вращение роликов; б - импульсная подача тока, шаговое вращение, постоянное давление; в - импульсная подача тока, шаговая сварка с переменным давлением

сталлизацию точки, улучшает условия охлаждения роликов, уменьшает их износ, стабилизирует качество точки. Давление на электродах может быть постоянным (см. рис. 11 б) или увеличиваться в конце сварки (рис. 11 в), что позволяет осуществлять проковку точки.

Характеры образования соединения при точечной сварке и при шовной, особенно при шаговой, практически аналогичны друг другу. С определенным приближением шовную сварку можно рассматривать как особый случай точечной, когда расстояние между точками минимально. Однако следует иметь в виду и некоторые особенности шовной сварки. Прежде всего это касается параметров режимов сварки. Так, из-за значительного шунтирования через ранее сваренные точки при шовной сварке требуются большие мощности, чем для точечной. С учетом более жестких режимов при шовной сварке и шунтирования сила тока по сравнению с точечной выбирается больше на 20...60%.

Достоинства шовной сварки - плотнопрочные швы, высокая производительность, возможность полностью автоматизировать процесс - обеспечили ей широкое применение при изготовлении узлов ЛА, авиационных двигателей, приборов, особенно там, где нужна герметизация. Это прежде всего - топливные баки, герметичные сосуды и контейнеры самого различного назначения. С помощью шовной сварки соединяются шпангоуты с цилиндрическими обечайками, чем обеспечивается высокая надежность соединений, работающих при значительных нагрузках.

2.3. Сварка взрывом

В последние годы все чаще в самых разных областях техники (ракетной, авиационной, автомобильной, а также в судостроении, аппаратостроении и др.) используется сварка взрывом. Этим способом соединяют самые различные (компактные и порошковые) металлы и сплавы, получают сложные композиционные материалы (два, три и более слоев) и осуществляют сложное формоизменение разнообразных материалов.

При сварке взрывом образование соединения происходит в процессе соударения двух свариваемых деталей (пластин) под воздействием ударной волны. При этом ударная волна очищает поверхность и деформирует прилегающие к зоне соединения приповерхностные объемы материала. Схема сварки показана на рис. 12.

Для получения соединения при сварке взрывом необходимо выполнение двух условий:

1. давление при соударении должно достичь определенного значения;
2. скорость перемещения точки соударения должна быть меньше скорости звука.

Давление при соударении зависит от скорости движения пластины, а скорость движения пластины - от соотношения c/m , где c - масса заряда; m - ускоряемая масса.

Так как ускорение движения пластины до конечной скорости занимает определенное время, между метаемой пластиной и мишенью должно быть достаточное расстояние (зазор). Давление на поверхности раздела при соударении должно быть в 10 раз больше предела текучести материала. Установлено, что обобщающим параметром сварки взрывом может быть пластическая деформация материала в зоне соединения. Скорость перемещения точки соударения не должна превышать скорости звука в металле по следующим причинам. Когда две пластины первоначально параллельны, и детонация распространяется с одного конца, скорость перемещения точки соударения равна скорости детонации заряда. Скорость ударной волны приближается к скорости звука в металле пластины (например, в алюминии 5240 м/с, в меди 3580 м/с). Если скорость детонации больше скорости звука, то отраженная звуковая волна может разрушить только что созданное сварное соединение. Поэтому подбирают такое взрывчатое вещество (ВВ) (аммониты, гранулиты, зерногранулиты), чтобы скорость детонации была от 2500 до 3600 м/с, тогда отраженная звуковая волна ударяется о свариваемую плоскость раньше, чем давление взрыва ударом соединит верхнюю пластину с нижней.

Большинство технологических схем сварки взрывом основано на использовании направленного (кумулятивного) взрыва. Кумулятивность осуществляется тем, что свариваемые детали располагаются под некоторым углом $2...16^\circ$ и начальным расстоянием друг от друга в вершине угла $2...3$ мм.

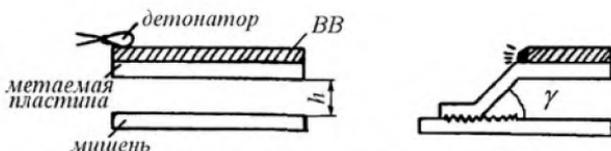


Рис. 12. Схема сварки взрывом с параллельным расположением пластин

Следует учесть, что воздушная кумулятивная струя во всех случаях движется с большей скоростью, чем звуковая и детонационная. Эта струя, направленная из острия угла γ в сторону его раствора, обладает давлением порядка от нескольких тысяч до 10^{11} Па. Благодаря такому огромному давлению и весьма большой скорости (6000...7000 м/с) высокотемпературная кумулятивная струя производит прежде всего идеальную очистку поверхности пластин от любого вида загрязнения. Однако эта же струя создает и весьма характерный волновой профиль на поверхности металла с высотой и длиной волн порядка десятых долей миллиметра.

Несмотря на большое давление воздушной кумулятивной струи и последующий за ней сильнейший удар детонационной волны взрыва, зона пластических деформаций в сварном контакте относительно невелика, она лишь немного превышает толщину фронта ударной волны, составляющую приблизительно 30...300 параметров кристаллической решетки. Исходная толщина свариваемых деталей почти не изменяется и после сварки. Весь процесс сваривания протекает за миллионные доли секунды, что и определяет значительное структурное своеобразие самого сварного соединения. В микромасштабе кристаллов металл нагревается почти до температуры кипения ($T_{кип}=2500$ К). В результате этих процессов происходит значительное упрочнение металла. Например, известно, что взрывным ударом твердость отожженной малоуглеродистой стали можно увеличить в 4 раза, предел текучести - в 6 раз. Качество взрывно-сварных соединений будет высоким, если правильно подобрать режимы сварки (сорт ВВ, его толщина, взаимное расположение деталей) для каждого сечения металлов. Сварные соединения выдерживают в дальнейшем любую механическую и термическую обработку.

Особенности процесса сварки взрывом следующие:

- сварное соединение образуется в течение миллионных долей секунды, т.е. практически мгновенно. Оно возникает вследствие образования металлических связей при совместном пластическом деформировании свариваемых поверхностей металла. Малая продолжительность сварки предотвращает возникновение диффузионных процессов. Это позволяет сваривать металлы, которые при обычных процессах сварки с расплавлением образуют в шве хрупкие интерме-

таллические вещества, делающие швы непригодными к эксплуатации;

- при сварке взрывом можно получить соединения неограниченной площади. При этом процесс сварки осуществляется тем легче, чем больше отношение площади соединения к толщине метаемой части металла. Можно осуществлять сварку соединений площадью 15...20 м².

2.4. Магнитно-импульсная сварка

Магнитно-импульсная сварка, как и сварка взрывом, характеризуется высокоинтенсивным силовым воздействием. Соединение образуется в результате соударения соединяемых частей, вызванного воздействием импульсного магнитного поля.

Процессы образования соединения при сварке взрывом и магнитно-импульсной сварке едины и рассмотрены выше. То же относится и к большинству технологических особенностей. Основными (регулирующими) параметрами магнитно-импульсной сварки является энергия магнитного импульса W , зазор между стационарным и метаемым элементами h , толщина метаемого элемента δ . Производными этих параметров являются скорость соударения метаемого элемента v и длительность его движения t . Независимым параметром (характеристикой установки) является длительность действия магнитного импульса t_δ .

В настоящее время разработано несколько типов оборудования для магнитно-импульсной сварки. Например, установка УМИС-02/20 имеет следующие характеристики: максимальная энергия магнитного импульса 20 кДж, частота разрядного тока 25 кГц, период разрядного тока 40 мкс. Форма и расположение трубчатых деталей перед сваркой и конфигурация рабочей зоны концентратора магнитного поля (индуктора 1) показаны на рис. 13. Под действием импульса магнитного поля метаемая деталь 2 приобретает ускорение в направлении неподвижной детали 3.

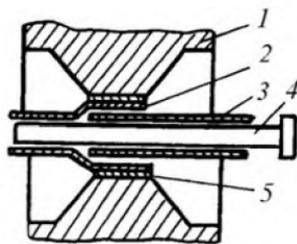


Рис. 13. Форма и расположение образцов перед сваркой: 1 – индуктор; 2 – метаемая трубка; 3 – стационарная трубка; 4 – оправка; 5 – изолирующая прокладка

Данный способ сварки в настоящее время находит практическое применение. Достоинством его по сравнению со сваркой

взрывом является отсутствие необходимости в применении взрывчатого вещества и простота регулирования основных параметров процесса.

2.5. Холодная сварка

Холодная сварка - это процесс получения неразъемного соединения пластичных металлов путем их совместного пластического деформирования при комнатной температуре.

Основными способами холодной сварки являются: точечная сварка внахлестку, шовная сварка внахлестку, сварка встык и сварка сдвигом.

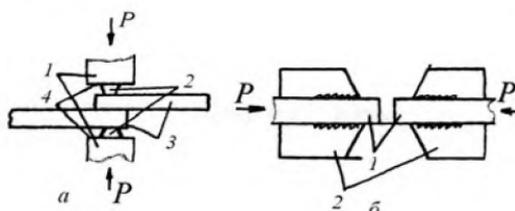


Рис. 14. Схемы процессов холодной сварки: а – холодная точечная сварка; б – сварка встык

На рис. 14 а представлена схема точечной сварки внахлестку. Действием прессы, сжимающего пуансоны 1 силой P , выступы 2 пуансонов вдавливаются в листы металла 3 до тех пор, пока опорные поверхности пуансона не упрутся в поверхности металла.

В месте вдавливания пуансонов остаточная толщина металла составляет лишь часть суммарной толщины листов. Сварка происходит при достижении определенной, достаточно большой степени деформации свариваемых материалов. В зависимости от вида свариваемого металла необходимая для холодной сварки степень деформации составляет 80...95%. Степень необходимой деформации при сварке друг с другом разнородных металлов определяется свойствами того из свариваемых материалов, при сварке которого в одноименном сочетании требуется меньшая деформация. Поэтому при сварке плохо свариваемых, мало пластичных металлов, применяют прокладки из пластичных хорошо свариваемых металлов.

Точечной сваркой успешно соединяются листы толщиной от 0,1...0,2 до 12...15 мм. Сила в расчете на одну точку при сварке, например, алюминия составляет в среднем 15...120 кН, давление на рабочую поверхность пуансона 600...800 МПа. Недостатком точечной сварки является глубокая вмятина в металле, часто на 80...90% его толщины.

Заменяв точечные пуансоны стальными роликами соответствующей конфигурации, катящимися по металлу, можно осуществить шовную сварку. Такой способ применяется преимущественно для получения кольцевых замкнутых швов, например, для приварки дна или крышки к бесшовному корпусу.

Схема сварки встык представлена на рис. 14 б. Подлежащие сварке стержни 1 закрепляют в зажимах 2. Концы свариваемых деталей выпускают из зажимных губок на определенную длину, называемую вылетом. При осадке правый и левый зажимы сближают до соприкосновения и острый край зажимов обрубают выдавленный металл. Таким образом свариваются стержни и проволока круглого, квадратного и прямоугольного сечений, полосы и т.п. Место сварки получается чистым и не требует последующей обработки.

Холодную сварку можно осуществить путем сдавливания соединяемых деталей с одновременным их тангенциальным относительным смещением. Этот способ сварки получил название сварки сдвигом. Тангенциальное смещение соединяемых изделий дает возможность получить сравнительно большие площади очищенных от пленок поверхностей при небольшом растекании каждой из них. При сварке сдвигом разноименных металлов прочное соединение возникает только у металлов с близкими механическими свойствами, например, у наклепанного алюминия, отожженной меди и др.

Во всех случаях обязательным условием получения высококачественных соединений является тщательная зачистка соединяемых поверхностей. Холодная сварка успешно применяется для изготовления токосъемников. При этом два алюминиевых листа свариваются по всей поверхности соприкосновения посредством совместной прокатки. Затем с помощью точечной сварки алюминиевые листы облицовываются мягкой листовой медью толщиной 0,8...1,0 мм. Такие токосъемники обладают хорошими электрическими свойствами и дают значительную экономию дефицитной меди.

Общий расход электроэнергии при холодной сварке в 20...30 раз меньше, чем при контактной электросварке. Применение холодной сварки ограничивается физическими свойствами металлов. Недостаточно пластичные металлы, например, высокопрочные алюминиевые сплавы, часто дают трещины при деформациях, необходимых для холодной сварки. Высокопрочные металлы даже и при достаточной пластичности практически не свариваются холод-

ным способом, так как удельные давления при этом настолько велики, что невозможно изготовить достаточно прочные приспособления и рабочий инструмент.

2.6. Сварка трением

Сварка трением является разновидностью сварки давлением, сварное соединение образуется в результате совместного пластического деформирования соединяемых деталей в твердой фазе. От других видов сварки давлением она отличается прежде всего способом нагрева, точнее - способом введения теплоты в свариваемые детали. При сварке трением механическая энергия, идущая на преодоление сил трения между состыкованными деталями, непосредственно преобразуется в тепловую, причем генерирование теплоты строго локализовано в тонких поверхностных слоях металла. Именно эта особенность процесса предопределяет основные достоинства сварки трением.

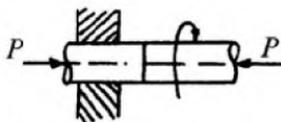


Рис. 15. Схема процесса сварки трением

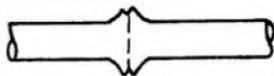


Рис. 16. Вид соединения, полученного сваркой трением

На рис. 15 представлена простейшая схема процесса сварки. Две детали, подлежащие сварке, располагаются соосно в зажимах машины; одна из них закрепляется неподвижно. На сопряженных поверхностях деталей, прижатых одна к другой осевой силой P , возникают силы трения. Работа, затрачиваемая на преодоление этих сил, превращается в теплоту, которая выделяется на поверхностях трения и вызывает их интенсивный нагрев до температур, необходимых для образования сварного соединения. Применительно к сварке черных металлов эти температуры в зависимости от режима процесса лежат в пределах 1223...1573 К. По достижении требуемой температуры относительное движение поверхностей должно быть по возможности быстро (мгновенно) прекращено; при этом прекратится и тепловыделение. Процесс образования сварного соединения завершается стадией проковки: к нагретым, но уже неподвижным деталям на некоторое время прикладывается сжимающая сила, значительно превышающая первоначальную. Во время проковки и после нее происходит естественное охлаждение сваренных деталей. Типичный вид соединения, полученного сваркой трением, представлен на рис.16.

Сварка трением обладает рядом достоинств: высокой производительностью, малым потреблением энергии (в 5...10 раз меньше, чем при контактной сварке); высоким качеством сварных соединений; стабильностью качества; возможностью сварки металлов и сплавов в различных сочетаниях; возможностью сварки деталей с необработанными поверхностями; простотой механизации и автоматизации. Многие из этих свойств являются результатом свойственного этому процессу локализованного выделения теплоты в тонких приповерхностных слоях металла, т.е. именно там, где это и требуется для сварки.

Особенностями сварки трением, ограничивающими или затрудняющими её применение, являются следующие:

- одна из деталей должна представлять собой тело вращения, ось которого совпадает с осью вращения, а другая деталь должна иметь плоскую поверхность, с которой сопрягается торец первой детали;
- нецелесообразно сваривать стержни диаметром больше 200 мм, т.е. диапазон сечений деталей, которые можно сваривать трением, лежит в пределах 30...8000 мм².

Расширить возможность применения сварки трением крупных деталей, вращение и, в особенности, быстрое торможение которых в конце процесса сильно затруднено, можно путем вращения вспомогательных деталей, зажатых между двумя не вращающимися и подлежащими сварке деталями. Эта схема позволяет также сваривать протяженные детали, например, трубы.

Внешними (независимыми) параметрами процесса являются скорость вращения и давление, приложенное вдоль оси соединения, определяющие мощность тепловыделения. Пластическая деформация при сварке трением является необходимым условием образования доброкачественного соединения. Поэтому третьим параметром процесса является мера пластической деформации, за которую может быть принято сближение свариваемых деталей в осевом направлении - осадка.

Четвертым параметром процесса сварки трением является давление проковки. Стадия проковки, наступающая сразу после окончания стадии нагрева (т.е. в момент торможения вращающейся детали), характеризуется тем, что металл, доведенный в результате нагрева до требуемых температур в стыке и достаточно притертый вдоль оси деталей, подвергается воздействию внешней силы, обжа-

тию, проковке. Это необходимо для окончательного сближения деталей, для "залечивания" пустот, которые могли образоваться в процессе относительного движения контактирующих поверхностей. От того, насколько сильно будет сжат (прокован) металл, после того как в стадии нагрева он был доведен до состояния повышенной пластичности, зависит качество будущего сварного соединения.

Около половины действующего в стране оборудования для сварки трением обслуживает производство концевых режущего инструмента (сверл, фрез и других), мерительного инструмента и деталей вращающегося центра для токарных станков. Сварка трением также используется для изготовления деталей гидро- и пневмоцилиндров, роторов турбокомпрессоров, биметаллических деталей, например, из стали и алюминия.

2.7. Ультразвуковая сварка

Ультразвуковая сварка - соединение металлов в твердом состоянии за счет возбуждения в свариваемых деталях упругих колебаний ультразвуковой частоты при одновременном создании определенного давления.

При ультразвуковой сварке необходимые условия для образования соединения создаются в результате механических колебаний ультразвукового преобразователя. Энергия вибрации создает сложные напряжения растяжения, сжатия и среза. Когда они превышают значение предела упругости соединяемых материалов, происходит пластическая деформация в зоне их соприкосновения. В результате пластической деформации и диспергирующего действия ультразвука происходит удаление адсорбированных пленок жидкости, газов, органических пленок и поверхностных окислов и образуется сварное соединение. В процессе деформирования происходит увеличение площади непосредственного контакта, что обеспечивает получение прочного соединения.

Можно выделить следующие преимущества сварки ультразвуком:

- сварка ультразвуком происходит в твердом состоянии без существенного нагрева места сварки (не более 0,3...0,5 от температуры плавления соединяемых металлов), что позволяет соединять химически активные металлы или металлы,

склонные образовывать хрупкие интерметаллические соединения в зоне сварки;

- возможны соединения тонких и ультратонких деталей, приварка тонких листов и фольги к деталям неограниченной толщины;
- сварка пакетов из фольги;
- снижены требования чистоты свариваемых поверхностей, в связи с чем возможна сварка плакированных и оксидированных поверхностей и вообще сварка металлических изделий, поверхности которых покрыты различными изоляционными пленками;
- использование сдвигающих сил (10...250 Н), которые вызывают незначительную деформацию поверхностей деталей в месте их соединения (вмятина, как правило, не превышает 5...10%);
- применение оборудования малой мощности и несложной конструкции. Например, для контактной точечной сварки алюминия толщиной 1 мм необходима машина мощностью 100...150 кВт, тогда как при сварке ультразвуком аналогичного соединения - всего 2,5...5 кВт.

Для получения механических колебаний высокой частоты обычно используется магнитострикционный эффект, заключающийся в изменении размеров некоторых металлов и сплавов под действием переменного магнитного поля. Для ультразвуковых преобразователей обычно используют чистый никель или железоникель-кобальтовые сплавы. Размеры магнитострикционных материалов изменяются незначительно, например, для никеля относительное магнитострикционное удлинение составляет $40 \cdot 10^{-6}$. Поэтому для увеличения амплитуды смещения и концентрации энергии колебаний, а также для подачи механических колебаний к месту сварки используют волноводы или концентраторы, которые в основном имеют сужающуюся форму. Эксперименты показывают, что для сварки металлов достаточно иметь волноводы с коэффициентом усиления около 5, при этом амплитуда на конце волновода при холостом ходе должна быть 20...30 мкм. Магнитострикционный преобразователь и волноводы должны быть рассчитаны на заданную частоту ультразвукового генератора.

Ультразвуковая сварка может быть (по аналогии с холодной) точечной, многоточечной, рельефной, шовной. На рис. 17.

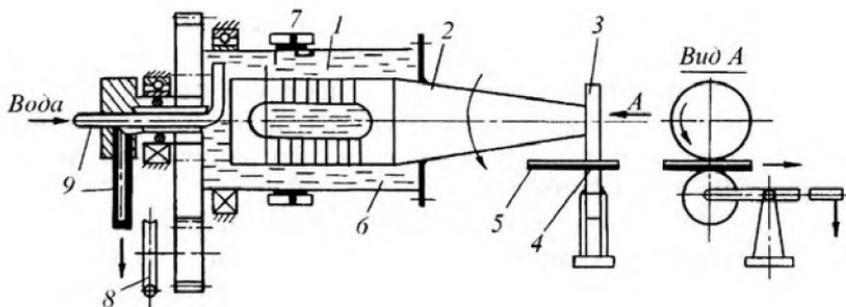


Рис. 17. Схема установки для роликовой сварки ультразвуком: 1 – магнитострикционный преобразователь; 2 – волновод; 3 – сваривающий ролик; 4 – прижимной ролик; 5 – изделие; 6 – кожух преобразователя; 7 – подвод тока от ультразвукового генератора; 8 – привод; 9 – подвод охлаждающей воды

приведены основные узлы машины для выполнения шовных соединений с помощью ультразвука. Изделие, подлежащее соединению, зажимают между вращающимся роликом волновода и холостым роликом. Высокочастотные упругие колебания передаются через волновод на ролик, который вращается вместе с волноводом. Изделие, зажатое между роликами, перемещается, и одновременно создается герметичное соединение.

Ультразвуковая сварка нашла достаточно широкое применение для соединения тонких деталей из однородных и разнородных материалов в приборостроении и радиоэлектронной промышленности. Сварка ультразвуком позволяет соединять различные металлы. Хорошо свариваются ультразвуком алюминий, медь, никель, удовлетворительно свариваются высоколегированные стали. При этом прочность сварных точечных соединений достаточно высока, разрушение соединений происходит обычно с вырывом точки по контуру как при испытании на срез, так и при испытании на отрыв. С помощью ультразвука получены соединения некоторых тугоплавких металлов - ниобия, тантала, молибдена и вольфрама. Однако сварные соединения вольфрама и молибдена очень хрупки.

2.8. Диффузионная сварка в вакууме

Диффузионная сварка в вакууме (ДСВ) как технологический процесс соединения однородных и разнородных материалов предложена и разработана российским ученым Н.Ф. Казаковым.

Отличительные особенности диффузионной сварки следующие.

1. Возможность сварки без расплавления, что обеспечивает отсутствие в шве литой структуры с пониженными механическими свойствами.
2. Возможность сварки материалов, не свариваемых плавлением: а) неметаллических материалов с металлическими (стекло и керамика с металлом); б) твердых сплавов со сталями; в) литейных жаропрочных сплавов; г) взаимно нерастворимых металлов, например, меди с вольфрамом или молибденом; д) ряда спеченных материалов, особенно при необходимости сохранения в шве исходной пористости (например, при изготовлении металлокерамических фильтров).
3. Возможность получения соединений, по всем показателям равноценных основному металлу.
4. Товарный вид деталей после сварки в вакууме, отсутствие необходимости дополнительной обработки.
5. Возможность сварки по развитой поверхности.
6. Возможность сварки деталей без ограничения в соотношении толщин (например, приварка фольги к массивной детали).
7. Возможность получения многослойных композиционных материалов.

Главным недостатком диффузионной сварки следует считать низкую производительность существующих установок.

Способ диффузионного соединения основан на сближении ювенильных (свободных от окисных пленок) поверхностей свариваемых деталей в вакууме при нагреве их несколько выше температуры рекристаллизации с приложением небольшой сжимающей силы и взаимной диффузии на границе раздела соединяемых поверхностей.

Температура сварки является основным параметром процесса. Она определяет условия термовакуумной очистки, образования физического контакта и активации атомов соединяемых поверхностей, лимитирует скорость и характер протекания объемного диффузионного взаимодействия. Как показывает опыт ДСВ разнообразных материалов, оптимальная температура сварки составляет 0,6...0,8 температуры плавления более легкоплавкого из соединяемых материалов. Температура сварки не должна превышать значе-

ний, при которых в свариваемых материалах могут происходить необратимые фазовые и структурные превращения, ухудшающие свойства сварного соединения.

Давление сжатия способствует активации поверхностей, формированию фактического контакта за счет микропластической деформации и ползучести микровыступов. Максимально допустимые значения давления необходимо выбирать такими, при которых величина макропластической деформации свариваемых деталей в зоне соединения минимальна.

Время сварки является функцией основных параметров процесса - температуры и давления. Время сварки определяет полноту протекания завершающего этапа стадии объемного диффузионного взаимодействия. Однако с увеличением времени сварки увеличивается общая пластическая деформация свариваемых деталей, поэтому верхний предел допустимого времени сварки целесообразно ограничивать. Нижнюю его границу можно ориентировочно определять, исходя из минимально необходимого времени термовакуумной очистки соединяемых поверхностей.

Степень вакуума и температура процесса определяют скорость и качество очистки соединяемых поверхностей. Чем выше степень вакуумирования, тем интенсивнее идет процесс дегазации деталей и объема камеры. Этим условиям отвечает вакуум, который обеспечивают серийные диффузионные установки ($10^{-2} \dots 10^{-3}$ Па).

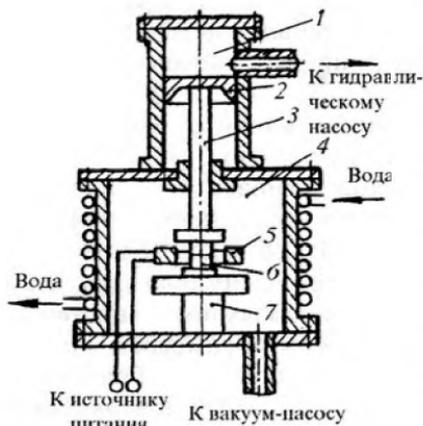


Рис. 18. Принципиальная схема установки для диффузионной сварки в вакууме

ДСВ осуществляется в определенной технологической последовательности на специальных установках, принципиальная схема одной из них показана на рис. 18. Детали 6 с предварительно подготовленными свариваемыми поверхностями (механически обработанные и обезжиренные) помещаются в камеру 4 и устанавливаются в центрирующем приспособлении 7. Затем камера герметизируется, и производится откачка воздуха с помощью вакуумных

насосов. При достижении требуемого вакуума включается высоко-частотный генератор и детали нагреваются в зоне сварки с помощью индуктора 5.

Очистка свариваемых поверхностей от окисных пленок, как правило, завершается за время нагрева детали до температуры сварки. При достижении температуры сварки к соединяемым деталям через поршень 2 и шток 3 гидросистемы 1 прикладывается рабочее давление, которое поддерживается до окончания процесса.

Последний этап цикла сварки - охлаждение свариваемого узла с заданной скоростью до температуры 323...473 К. После этого снимается давление сжатия, в камеру напускается воздух и она открывается.

Длительность всего цикла сварки зависит от массы, формы и размеров свариваемых деталей, физико-механических свойств входящих в соединение материалов.

При сварке разнородных материалов в процессе объемного взаимодействия возможно образование в контакте слоя интерметаллидов, который резко снижает прочностные характеристики соединения. В этих случаях между деталями помещают прослойку из материала, который не образует интерметаллических соединений с каждым из свариваемых материалов. Кроме того, в зависимости от соединяемой композиции прослойка может выполнять и другие функции. При соединении разнородных материалов с различными коэффициентами термического расширения для релаксации внутренних напряжений в стык вводится прослойка из материала, имеющего промежуточное значение коэффициента термического расширения. Прослойки из пластичных металлов применяются для сварки материалов, обладающих высокой твердостью (например, твердых сплавов, жаропрочных сталей).

Прочность диффузионных соединений с мягкой прослойкой значительно повышается с уменьшением ее толщины (т.н. эффект контактного упрочнения). Поэтому толщины прослоек выбираются минимально возможными.

Применение различных прослоек является важным достоинством диффузионной сварки и существенно расширяет область её применения.

Опыт применения диффузионной сварки в вакууме показывает, что этот способ позволяет получать высококачественные составные конструкции из различных материалов, применяемых в

производстве ЛА и их двигателей: сталей, графита, титановых сплавов, керамики (роторы турбоагрегатов, модули уплотнений и др.), алюминиевых сплавов, сталей (переходники, зубчатые передачи и др.).

3. Сварка плавлением. Основные способы сварки и их особенности

3.1. Особенности формирования соединений при сварке плавлением

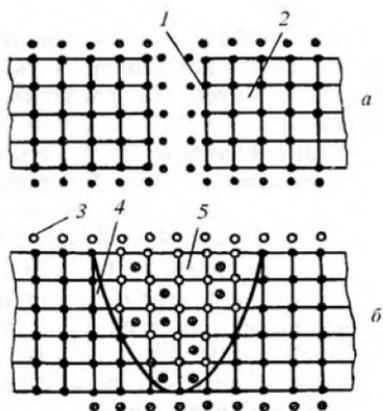


Рис. 19. Схема образования соединения при сварке плавлением

При сварке плавлением (рис. 19) удаление атомов поверхностных загрязнений 3, активация поверхностных атомов 1 соединяемого металла 2, формирование физического контакта и химических связей между атомами металла осуществляются в результате местного расплавления соединяемых поверхностей и образования общей сварочной ванны. В жидком металле связи между атомами сохраняются, в том числе и на межфазной границе 4, образующейся при расплавлении кромок соединяемых частей металла. Поэтому для образования непрерывных межатомных связей достаточно появления общей сварочной ванны 5. При этом исчезают границы раздела между соединяемыми поверхностями. Таким образом, образование общей сварочной ванны является основным и обязательным этапом формирования соединений при сварке плавлением.

Процесс сварки плавлением - это комплекс одновременно протекающих физических процессов, основными из которых являются: плавление кромок соединяемых деталей и во многих случаях плавление электродной или присадочной проволоки в зоне сварки; металлургические процессы, протекающие в расплавленном металле; тепловое воздействие на основной металл в околошовных зонах; кристаллизация расплавленного металла и формирование металла шва.

Для реализации сварки плавлением используются источники энергии различного вида. Наибольшее распространение в производстве ЛА получили процессы сварки, в которых для нагрева применяются: электрическая дуга, плазменная струя, электронный луч. Менее распространены газовое пламя, световой и лазерный лучи, электрорасплав, реакция термита и др.

3.2. Дуговые виды сварки

3.2.1. Электрическая дуга и ее свойства

Наибольшее распространение в машиностроении получила электродуговая сварка. Рассмотрим подробнее особенности электродуговой сварки.

Электрической дугой называется продолжительный разряд электрического тока между двумя электродами, происходящий в газовой среде. Электрическая дуга, используемая для сварки металлов, называется сварочной дугой. Такая дуга в большинстве случаев горит между электродом и изделием, т.е. является дугой прямого действия.

Дуга прямого действия постоянного тока, горящая между металлическим электродом (катодом) и свариваемым металлом (анодом), имеет несколько ясно различимых областей (рис. 20). Электропроводный газовый канал, соединяющий электроды, имеет форму усеченного конуса или цилиндра. Его свойства на различных расстояниях от электродов неодинаковы. Тонкие слои газа, примыкающие к электродам, имеют сравнительно низкую температуру. В зависимости от полярности электрода, к которому они примыкают, эти слои называются катодной 2 и анодной 4 областями дуги.

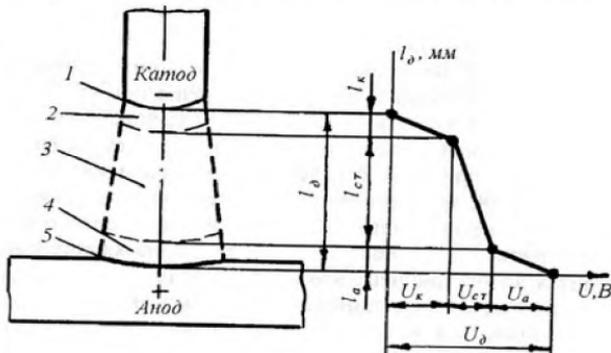


Рис. 20. Строение электрической сварочной дуги и распределение напряжений на её участках

Протяженность катодной области l_k определяется длиной свободного пробега нейтральных атомов и составляет порядка 10^{-5}

см. Протяженность анодной области l_a определяется длиной свободного пробега электрона и составляет примерно 10^{-3} см. Между приэлектродными областями располагается наиболее протяженная, высокотемпературная область разряда - столб дуги l_c .

На поверхности катода и анода образуются пятна, называемые, соответственно, катодное 1 и анодное 5 пятно, являющиеся основаниями столба дуги, через которые проходит весь сварочный ток. Электродные пятна выделяются яркостью свечения при сравнительно невысокой их температуре (2600... 3200 К). Температура в столбе дуги достигает 6000...8000 К.

Общая длина сварочной дуги l_0 равна сумме длин всех трех её областей ($l_0=l_a+l_k$) и для реальных условий составляет 2...6 мм.

Общее напряжение сварочной дуги, соответственно, складывается из суммы падений напряжений в отдельных областях дуги $U_l = U_a + U_K + U_{CT}$ и находится в пределах от 20 до 40 В. Зависимость напряжения в сварочной дуге от её длины описывается уравнением $U_0 = a + bl_0$, где a - сумма падений напряжений в катодной и анодной областях, В; l_0 - длина столба дуги, мм; b - удельное падение напряжения в дуге, т.е. отнесенное к 1 мм длины столба дуги, В/мм.

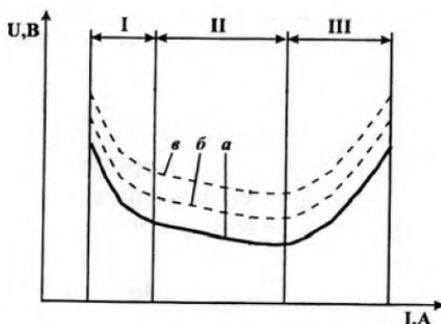


Рис. 21. Статические вольт-амперные характеристики: а - для короткой; б - средней; в - длинной сварочной дуги

Одной из основных характеристик электрического дугового разряда является статическая вольт-амперная характеристика - зависимость напряжения дуги при постоянной ее длине от силы тока в ней (рис. 21).

С увеличением длины дуги напряжение увеличивается и кривая статической вольтамперной характеристики дуги поднимается выше, примерно сохраняя при этом свою форму (кривые а, б, в). На ней различают три области: падающую I, жесткую (почти горизонтальную) II и возрастающую III. В зависимости от условий горения дуги ей соответствует один из участков характеристики. При ручной дуговой сварке покрытыми электродами, сварке в защитных газах

неплавящимся электродом и сварке под флюсом на сравнительно небольших плотностях тока характеристика дуги будет вначале падающей, а при увеличении тока полностью перейдет в жесткую. При этом с увеличением сварочного тока пропорционально увеличиваются поперечное сечение столба дуги и площади поперечного сечения анодного и катодного пятен. Плотность тока и напряжение дуги остаются постоянными.

При сварке под флюсом и в защитных газах тонкой электродной проволокой на больших плотностях тока характеристика дуги становится возрастающей. Это объясняется тем, что диаметры катодного и анодного пятен становятся равными диаметру электрода и больше увеличиваться не могут. В дуговом промежутке наступает полная ионизация газовых молекул и дальнейшее увеличение сварочного тока может происходить лишь за счет увеличения скорости движения электронов и ионов, т. е. за счет увеличения напряженности электрического поля. Поэтому для дальнейшего увеличения сварочного тока требуется увеличение напряжения дуги.

Сварочная дуга представляет собой мощный концентрированный источник теплоты. Почти вся электрическая энергия, потребляемая дугой, превращается в тепловую. Полная тепловая мощность дуги $Q = I_{св} U_{д}$ (Дж/с) зависит от силы сварочного тока $I_{св}$ (А) и напряжения дуги $U_{д}$ (В).

Следует отметить, что не вся теплота дуги затрачивается на нагрев и плавление металла. Часть её бесполезно расходуется на нагрев окружающего воздуха или защитного газа, радиационное излучение и т.д. В связи с этим эффективная тепловая мощность дуги $q_{эф}$ (Дж/с) (та часть теплоты сварочной дуги, которая вводится непосредственно в изделие) определяется следующим соотношением: $q_{св} = Q \cdot \eta = I_{св} U_{д} \eta$, где η - коэффициент полезного действия (КПД) процесса нагрева изделия сварочной дугой, определяемый опытным путем.

Коэффициент η зависит от способа сварки, материала электрода, состава покрытия или флюса и ряда других факторов. Например, при сварке открытой дугой угольным или вольфрамовых электродом он составляет в среднем 0,6; при сварке покрытыми (качественными) электродами - около 0,75; при сварке под флюсом - 0,8 и более.

3.2.2. Источники питания сварочной дуги

В сварочную систему при дуговой сварке входят источник питания и сварочная дуга. Требуемое качество сварного соединения обеспечивается в том случае, если система во время сварки работает устойчиво, стабильно во всех её звеньях и, прежде всего, если обеспечивается устойчивое горение дуги.

Для обеспечения устойчивости горения дуги источники питания для дуговой сварки должны удовлетворять следующим требованиям: 1) иметь напряжение холостого хода $U_{хх}$, т.е. напряжение на зажимах источника тока при разомкнутой сварочной цепи, достаточное для легкого возбуждения дуги и устойчивого её горения, но не превышающее норм безопасности работы, т.е. не более 80...90 В; 2) обладать достаточной мощностью для выполнения сварочных работ; 3) обеспечивать ток короткого замыкания $I_{кз}$, не превышающий установленных значений, чтобы источник тока выдерживал продолжительные короткие замыкания сварочной цепи без перегрева и повреждения обмотки, при достаточной стабильности процесса; 4) обладать хорошими динамическими свойствами - обеспечивать быстрое восстановление напряжения дуги после коротких замыканий; 5) иметь устройства для плавного регулирования силы сварочного тока; 6) обладать требуемой внешней характеристикой (рис. 22). Внешней характеристикой источника питания называется зависимость между напряжением на его выходных зажимах и током в сварочной цепи.

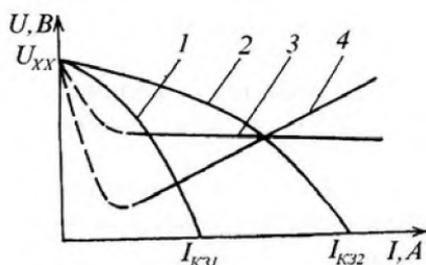


Рис. 22. Внешние характеристики источников питания сварочной дуги

Внешние характеристики источников питания могут быть: крутопадающими 1, пологопадающими 2, жесткими 3 и возрастающими 4.

Для питания сварочной дуги применяют источники переменного (сварочные трансформаторы) и постоянного тока (сварочные выпрямители и сварочные генераторы). Сварочные трансформаторы, благодаря своим технико-экономическим показателям, имеют преимущества по сравнению с источниками постоянного тока. Они проще в эксплуатации, долговечнее, обладают более высоким КПД. Источники постоянного тока предпочтительнее в техно-

логическом отношении. При их применении повышается устойчивость горения дуги, улучшаются условия сварки в различных пространственных положениях и др.

Для стабильной работы системы источник питания - сварочная дуга требуется равенство тока и напряжения дуги току и напряжению источника питания. Кроме того, необходимо соответствие внешней вольт-амперной характеристики источника и статической вольт-амперной характеристики дуги. В точке их пересечения (точка В, рис. 23) наблюдается равенство значений тока и напряжения источника питания и сварочной дуги. Условие устойчивого горения дуги в дифференциальной форме имеет следующий вид:

$$\frac{\partial U_{\phi}}{\partial J} > \frac{\partial U_u}{\partial J} \quad (1)$$

или

$$k_y = \left(\frac{\partial U_{\phi}}{\partial J} > \frac{\partial U_u}{\partial J} \right) > 0, \quad (2)$$

где U_{ϕ} , U_u - напряжение дуги и источника в установившемся режиме; I_{ϕ} , I_u - ток дуги и источника в установившемся режиме; k_y - коэффициент динамической устойчивости системы источник питания - сварочная дуга.

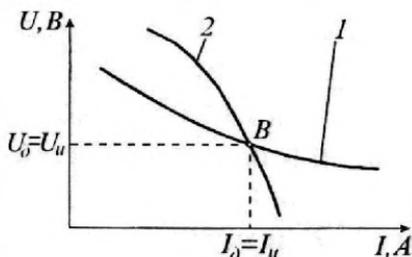


Рис. 23. Условия устойчивого протекания процесса ручной дуговой сварки: 1 - статическая вольт-амперная характеристика; 2 - внешняя (крутопадающая) характеристика источника питания

Анализ зависимостей (1) и (2) позволяет сделать следующие выводы. Для питания дуги с падающей или жесткой характеристикой целесообразно применять источники питания с крутопадающей или падающей полого внешней характеристикой. Для питания дуги с возрастающей характеристикой - источники тока с жесткой или возрастающей внешней характеристикой.

Окончательно внешнюю характеристику источника выбирают исходя из анализа конкретных условий ведения процесса дуговой сварки.

3.2.3. Ручная дуговая сварка

В настоящее время при изготовлении сварных конструкций широко применяется ручная дуговая сварка - сварка плавящимися штучными электродами, при которой подача электрода и перемещение дуги вдоль свариваемых кромок производятся вручную.

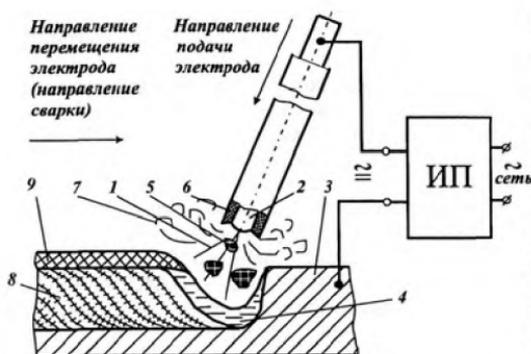


Рис. 24. Схема ручной дуговой сварки покрытыми электродами; ИП – источник питания

Схема процесса показана на рис. 24. Сварочная дуга 1 горит между металлическим стержнем электрода 2 и основным металлом 3. Под действием теплоты дуги металл электрода и основной металл плавятся, образуя металлическую сварочную ванну 4. Капли жидкого металла 5 с торца расплавляемого электродного стержня переносятся

в ванну через дуговой промежуток. Вместе со стержнем плавится покрытие электрода 6, образуя газовую защиту 7 вокруг дуги и жидкую шлаковую ванну на поверхности расплавленного металла. По мере движения дуги металл сварочной ванны затвердевает, и образуется сварной шов 8. Жидкий шлак по мере остывания образует на поверхности шва твердую шлаковую корку 9, которая удаляется после остывания шва. Для обеспечения заданного состава и свойств металла шва сварку выполняют покрытыми электродами, к которым предъявляют специальные требования.

Стальную сварочную проволоку, предназначенную для всех видов сварки плавлением и изготовления электродов, выпускают диаметром от 0,3 до 12мм. Покрытие электрода - смесь веществ для обеспечения ионизации дугового промежутка, защиты от вредного воздействия воздуха и металлургической обработки сварочной ванны. В покрытие входят следующие компоненты: ионизирующие (стабилизирующие), газообразующие, шлакообразующие, легирующие, раскислители, связующие и формовочные добавки.

Для повышения производительности процесса сварки в состав покрытия добавляют железный порошок - до 60% массы покрытия.

Условное обозначение электродов для ручной дуговой сварки состоит из обозначения марки электрода, его типа, диаметра стержня и типа покрытия. Например, условное обозначение электрода для сварки конструкционных сталей

Э46А-УОНИ 13/45-3.0-УД2

E432(5)-B10

В соответствии с ГОСТ 9467-75 это обозначение расшифровывается: Э46А - тип электрода; УОНИ-13/45 - марка электрода; 3,0 - диаметр стержня, мм; У - электроды для сварки углеродистых и низколегированных конструкционных сталей; Д2 - толщина покрытия электрода; Е435(5) - характеристики наплавленного данным электродом металла; 43 - временное сопротивление разрыву, не менее 430 МПа; 2 - относительное удлинение, не менее 22%; 5 - ударная вязкость, не менее 0,34 МДж/м² при температуре 233 К; Б - основное покрытие; 1 - электрод может быть использован для сварки в любых пространственных положениях; 0 - электрод предназначен для сварки на постоянном токе обратной полярности.

Под режимом сварки понимается совокупность ряда факторов (параметров) сварочного процесса, обеспечивающих устойчивое горение дуги и получение сварных швов заданных размеров, формы и качества. При ручной дуговой сварке покрытыми электродами к ним относят: диаметр электрода ($d_э$), силу сварочного тока ($I_{св}$), напряжение дуги ($U_д$), род и полярность сварочного тока, скорость сварки ($v_{св}$), положение шва в пространстве, необходимость подогрева и последующей термообработки сварного узла.

Дуга может возбуждаться двумя приемами: касанием впри-тык и отводом перпендикулярно вверх электрода от поверхности изделия или "чирканием" электродом, как спичкой. Второй способ удобнее, но неприемлем в узких и неудобных местах.

В процессе сварки необходимо поддерживать определенную длину дуги, которая зависит от марки и диаметра электрода. Ориентировочно нормальная длина дуги должна быть в пределах $l_д=(0,5-1,1)d_э$, где $l_д$ - длина дуги, мм; $d_э$ - диаметр электрода, мм. Длина дуги оказывает существенное влияние на качество сварного шва и его геометрическую форму. Длинная дуга способствует более интенсивному окислению и азотированию расплавленного металла, увеличивает разбрызгивание, приводит к пористости металла шва.

3.2.4. Автоматическая дуговая сварка под флюсом

В производстве ЛА наибольшее распространение получили автоматические способы электродуговой сварки. В соответствии с ГОСТ 2601-74 автоматической называют сварку, при которой подача плавящегося электрода и перемещение дуги вдоль свариваемых кромок механизированы. Для перемещения сварочной дуги вдоль

спариваемых кромок возможно два варианта: во-первых, это перемещение сварочной горелки с помощью сварочного трактора; во-вторых, перемещение изделия относительно сварочной горелки.

Автоматическая дуговая сварка под флюсом осуществляется с использованием плавящегося электрода и введением в зону дуги для создания защиты гранулированного флюса, слой которого полностью закрывает дугу и, частично расплавляясь, создает вокруг нее подвижную защитную оболочку, перемещающуюся вместе с дугой.

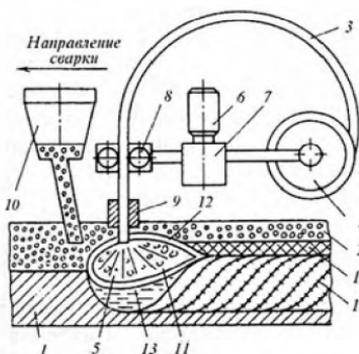


Рис. 25. Схема автоматической дуговой сварки под флюсом

Основная особенность процесса автоматической сварки под флюсом состоит в том, что сварочная дуга 5 (рис. 25) горит не на открытом воздухе, а под слоем флюса 2 между электродной проволокой 3, поступающей из бункера 4, и свариваемым изделием 1. Электродвигатель 6 через редуктор 7 вращает подающие ролики 8, которые обеспечивают поступление проволоки в зону горения дуги со скоростью ее плавления. Сварочный ток подводится через токоподводящий мундштук (или токоподводящие ролики) 9.

Флюс под действием собственного веса поступает из бункера 10 в зону сварки.

За счет теплоты электрической дуги расплавляются основной металл, электродная проволока и часть флюса, непосредственно прилегающего к зоне сварки.

Расплавленный флюс образует плотную оболочку - флюсогазовый пузырь 11, над которым находится слой жидкого шлака 12. Флюсогазовый пузырь надежно защищает расплавленный металл от вредного воздействия кислорода и азота воздуха, а также препятствует его разбрызгиванию. Во флюсогазовом пузыре создается достаточно большое давление газов, которые оттесняют часть жидкого металла сварочной ванны 13 в противоположную направлению сварки сторону. После остывания жидкого металла сварочной ванны образуется сварной шов 14, покрытый затвердевшей коркой шлака 15. После окончания сварки и охлаждения металла шва шлаковая корка легко отделяется.

Автоматическая дуговая сварка под флюсом имеет ряд преимуществ перед другими видами сварки плавлением:

1. Высокая производительность благодаря возможности применения больших токов, а также почти полному отсутствию потерь металла на угар и разбрызгивание. Увеличение плотности тока позволяет сваривать металл значительной толщины без разделки кромок и увеличивать количество металла, наплавленного в единицу времени.
2. Высокое качество сварных швов, что достигается надежной защитой металла шва от воздействия кислорода и азота воздуха, однородностью металла шва по химическому составу, улучшением формы шва и постоянства его размеров. Одновременно обеспечивается меньшая вероятность образования непроваров, подрезов и других дефектов формирования шва и отсутствуют перерывы в процессе сварки, вызываемые сменой электрода.
3. Автоматизация процесса путем механизированной подачи варочной проволоки в зону сварки и механизированного перемещения сварочной дуги по свариваемому стыку.

Недостатками процесса сварки под флюсом являются возможность сварки только в нижнем положении (наклон изделия до 15°), трудности применения в монтажных условиях и на коротких швах.

Автоматическую сварку под флюсом применяют в заводских и монтажных условиях для сварки в нижнем положении металла толщиной 2...100 мм. Сваривают стали различного состава, медь, титан, алюминий и сплавы на их основе.

3.2.5. Дуговая сварка в защитных газах

Способы электродуговой сварки в защитных газах в настоящее время являются основными при изготовлении и сборке сварке различных деталей и агрегатов ЛА.

Сущностью и отличительной особенностью этого вида дуговой сварки является защита расплавленного и нагретого до высокой температуры основного металла от вредного влияния воздуха защитными газами.

Защитные газы изолируют сварочную дугу и металл сварочной ванны от вредного воздействия окружающей среды. Ис-

пользуются инертные (Ar, He) и активные (CO_2 , N_2 , H_2) газы, а также их смеси.

Инертные газы применяют для сварки химически активных металлов (титан, алюминий, магний и др.), а также во всех случаях, когда необходимо получать сварные швы, однородные по химическому составу с основным и присадочным металлом (например, при сварке высоколегированных сталей). Инертные газы обеспечивают защиту дуги и свариваемого металла, не оказывая на него металлургического воздействия. Активные защитные газы, в отличие от инертных, вступают в химическое взаимодействие со свариваемым металлом, растворяются в нем и оказывают на него металлургическое воздействие. Основным активным газом, используемым для защиты зоны сварки, является углекислый газ (CO_2). Смеси газов в ряде случаев обладают лучшими технологическими свойствами, чем отдельные газы. Например, смесь углекислого газа с кислородом (2...5%) способствует мелкокапельному переносу металла, уменьшению разбрызгивания (на 30...40%), улучшению формирования шва. Применение смеси из 70% He и 30% Ar позволяет увеличивать производительность при сварке алюминия, улучшает формирование шва и позволяет сваривать за один рабочий ход металл большей толщины.

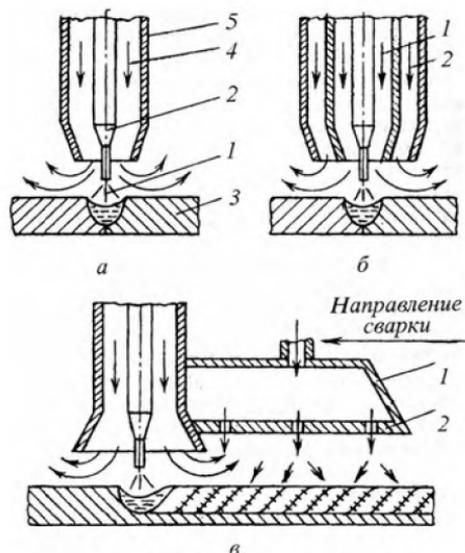


Рис. 26. Схема дуговой сварки в среде защитных газов

На рис. 26 представлена схема дуговой сварки в среде защитных газов.

Электрическая дуга 1 возбуждается между вольфрамовым электродом 2 и свариваемым изделием 3 и защищается от окружающей атмосферы струей газа (как правило, аргона) 4, подаваемого через сопло 5 сварочной горелки (рис. 26 а). Вольфрамовый электрод находится внутри сопла горелки, что обеспечивает его охлаждение струей защитного газа и повышение стойкости против термического разрушения. Формирование ме-

талла шва может происходить как за счет оплавления кромок соединяемых деталей, так и за счет дополнительного введения в зону сварочной дуги присадочной проволоки. Защитный газ начинают подавать за 10...15 с до начала сварки. Электрическая дуга возбуждается кратковременным разрядом тока высокой частоты и напряжения с помощью осциллятора. По окончании сварки дугу обрывают постепенно для заварки кратера. Для защиты охлаждающегося металла подачу газа прекращают через 10...15 с после выключения сварочного тока.

В ряде случаев с целью экономии инертных газов, а также повышения технологических свойств защитной среды применяют горелки, конструкция которых обеспечивает комбинированную защиту двумя концентрическими потоками газов (рис. 26 б). Например, внутренний поток 1 образуется аргоном, а внешний 2 углекислым газом. При сварке высокоактивных металлов (Ti, Zr, Ta, W, Mo, Nb) необходимо защищать не только расплавленный металл, но и зону металла, нагревающуюся при сварке до температуры более 300°C. Для этого применяют дополнительные насадки 1 (рис.26 в) с распределительными сетками 2 для выхода защитного газа по длине шва. Наиболее эффективная защита металла шва и зоны термического влияния обеспечивается при сварке в камерах с контролируемой атмосферой. Камеры предварительно вакуумируются, а затем заполняются защитным газом (как правило, инертным) под небольшим давлением.

Аргонодуговая сварка - это процесс дуговой сварки, при котором в качестве защитного газа используется аргон. Применяют аргонодуговую сварку неплавящимися вольфрамовым или плавящимся электродами. В качестве плавящихся электродов, как правило, используют сварочные проволоки, по химическому составу соответствующие свариваемым материалам и лишь в некоторых случаях с несколько повышенным содержанием кремния и марганца.

Неплавящиеся электроды служат для возбуждения и поддержания горения сварочной дуги. В основном используют вольфрамовые (диаметром от 0,2 до 12 мм), реже угольные и графитовые электроды (при сварке в активных газах). Для повышения устойчивости горения дуги, стойкости электрода и его эмиссионной способности в состав вольфрамового электрода вводят обычно 1,5...3% окислов активирующих редкоземельных металлов (тория, лантана, иттрия).

Аргонодуговая сварка неплавящимся вольфрамовым электродом может быть ручной и автоматической, с подачей и без подачи присадочной проволоки. Процесс применяется главным образом для металлов толщиной не более 5 мм. Большинство материалов сваривают на постоянном токе прямой полярности, а сварку алюминия, магния бериллия и ряда высоколегированных сталей - на переменном токе.

При сварке на прямой полярности (минус на электроде) создаются лучшие условия для термоэлектронной эмиссии, обеспечивается достаточно высокая стойкость вольфрамового электрода и используются большие сварочные токи. Сварочная дуга при прямой полярности легко возбуждается и горит устойчиво при напряжении 10...15 В в широком диапазоне сварочных токов.

При обратной полярности (минус на изделии) возрастает напряжение на дуге, уменьшается устойчивость ее горения, резко уменьшается стойкость вольфрамового электрода против термической эрозии, повышается температура его нагрева и расход. Однако сварочная дуга при обратной полярности обладает важными и положительными технологическими свойствами. При ее воздействии на свариваемый металл с его поверхности легко удаляются окислы и загрязнения. Это объясняется тем, что при обратной полярности поверхность свариваемого металла бомбардируется тяжелыми положительно заряженными ионами аргона, которые, перемещаясь под действием электрического поля от плюса (электрод) к минусу (изделие), разрушают окисные пленки на поверхности свариваемого металла, а выходящие с катода (поверхности изделия) электроны способствуют удалению разрушенных окисных пленок. Этот процесс разрушения и удаления окисной пленки с поверхности свариваемого металла называется катодным распылением. Данное свойство сварочной дуги обратной полярности используют при сварке Al, Be, Mg и их сплавов, на поверхности которых всегда присутствуют химически активные и механически прочные окисные пленки.

Следует отметить, что при сварке на постоянном токе обратной полярности стойкость вольфрамового электрода против термической эрозии и разрушения недостаточна, поэтому сварку Al, Be, Mg и их сплавов чаще ведут на переменном токе. При этом разрушение и удаление окисной пленки, т.е. процесс катодного распыления, происходит в те полупериоды, когда свариваемое изделие является катодом. Таким образом, при сварке неплавящимся

электродом на переменном токе в определенной степени реализуются преимущества дуги прямой и обратной полярности, т.е. обеспечиваются и стойкость вольфрамового электрода, и разрушение окисных пленок.

Аргонодуговая сварка плавящимся электродом применяется для сварки цветных металлов (Al, Mg, Cu, Ti и их сплавов) и легированных сталей. Этот вид сварки является механизированным, её выполняют на автоматах и полуавтоматах. Сварка в защитных газах плавящимся электродом осуществляется, как правило, на постоянном токе обратной полярности, что позволяет максимально использовать теплоту сварочной дуги и увеличить глубину проплавления на единицу сварочного тока. К основным параметрам режима сварки плавящимся электродом относятся: сила тока, его полярность, напряжение дуги, диаметр и скорость подачи электродной проволоки, состав и расход защитного газа, скорость сварки. Сварочный ток, сила которого определяет размеры шва и производительность процесса, зависит от диаметра проволоки и устанавливается в соответствии со скоростью её подачи.

Механизированную сварку выполняют обычно при меньшей силе тока, чем автоматическую. Сварку плавящимся электродом можно выполнять в различных пространственных положениях, используя проволоку диаметром до 2 мм. Сварка швов, расположенных в нижнем положении, выполняется проволокой диаметром 1,2...3,0 мм.

Отличительной особенностью **сварки в углекислом газе плавящимся электродом** является необходимость применения электродных проволок с повышенным содержанием элементов-раскислителей (кремния и марганца), компенсирующих их выгорание в зоне сварки и предотвращающих дополнительное окисление металла шва и образование в нем пор. Для углеродных сталей в основном используют сварочные проволоки марок Св-10ГС, Св-08Г2С. Причины возможного окисления и образования пор при сварке в углекислом газе следующие. Под действием теплоты сварочной дуги углекислый газ диссоциирует с образованием атомарного кислорода по реакции:



Атомарный кислород окисляет железо и легирующие элементы, содержащиеся в стали:



В результате этого металл сварочной ванны насыщается кислородом, а его свойства ухудшаются. При охлаждении расплавленного металла углерод, содержащийся в стали, окисляясь, способствует образованию окиси углерода по реакциям:



Образующийся при кристаллизации металла шва углекислый газ выделяется в виде пузырьков, часть из которых, не успевая покинуть металл сварочной ванны, остается в металле шва, образуя поры.

В том случае, если сварочная проволока легирована кремнием и марганцем, окислы железа раскисляются не за счет углерода, а в основном за счет этих элементов, в результате чего предотвращается образование окиси углерода и образование пор. Разложение окислов железа идет по реакциям:



Окислы SiO_2 и MnO в виде шлака скапливаются на поверхности сварочной ванны, а после её кристаллизации - на поверхности металла шва.

Сварка в углекислом газе характеризуется высокой производительностью и низкой стоимостью. К недостаткам её относятся: повышенное разбрызгивание расплавленного металла и не всегда удовлетворительный внешний вид сварного шва.

Основные преимущества сварки в защитных газах:

- высокая производительность (примерно в 1,5...2 раза выше, чем при автоматической дуговой сварке под флюсом) за счет использования большой плотности тока на единицу поперечного сечения электродной проволоки и отсутствия необходимости зачистки поверхности шва от шлака;
- высокое качество шва за счет надежной защиты зоны сварки от взаимодействия с окружающей средой;
- возможность сварки в различных пространственных положениях, получение соединений практически любой формы и конфигурации;
- узкая зона термического влияния и относительно небольшие деформации изделий ввиду высокой концентрации теплоты сварочной дуги;
- возможность сварки металлов различной толщины (от долей миллиметра до десятков миллиметров);

- широкие возможности механизации и автоматизации процесса сварки;
- возможность наблюдения и корректирования процесса сварки.

Недостатками сварки в защитных газах является открытая дуга, что повышает возможность поражения оператора-сварщика световым излучением, и необходимость защиты зоны сварки от сквозняков (при местной защите), что осложняет применение этого способа сварки в монтажных условиях на открытом воздухе.

3.3. Электронно-лучевая сварка

Кроме электродуговых способов сварки в производстве ЛА нашли применение лучевые способы сварки, прежде всего электронно-лучевая сварка.

При электронно-лучевой сварке нагрев материала до расплавления осуществляют бомбардировкой его пучком электронов, летящих с большой скоростью в вакууме. Сварное соединение в виде шва образуется в процессе кристаллизации расплавленного металла, находящегося в сварочной ванне.

В установках для сварки свободные электроны концентрируют в пучок и сообщают им большую скорость с целью увеличения их кинетической энергии, которая затем переходит в тепловую энергию при резком торможении в материале. Существуют различные схемы для получения свободных электронов - электронных пушек. Свободные электроны получают, применяя термоэлектронные катоды (например, из гексаборида лантана LaB_6), обладающие высокими эмиссионными свойствами.

На рис. 27 представлена схема электронно-лучевой сварки. Ускорение и концентрацию электронов осуществляют электрическими и магнитными полями с помощью электромагнитных линз. Электронно-лучевая установка состоит из следующих основных

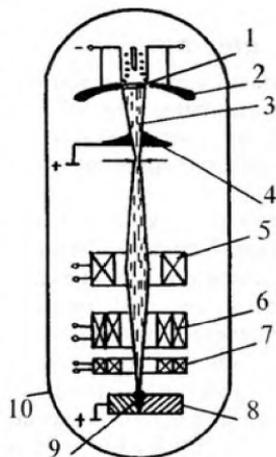


Рис. 27. Схема электронно-лучевой сварки:
 1 – катод; 2 – прикатодный электрод; 3 – электронный луч; 4 – ускоряющий анод; 5 – фокусирующая электромагнитная линза; 6, 7 – электромагнитная система отклонения луча; 8 – свариваемые детали; 9 – сварной шов; 10 – вакуумная камера

устройств: электронная пушка; высоковольтный источник тока, обеспечивающий получение ускоряющего напряжения до 200 кВ и более; вакуумная камера, где размещаются свариваемые детали; вакуумные насосы, создающие разрежение порядка $6 \cdot 10^{-3}$ Па; контрольно-распределительная вакуумная аппаратура. В настоящее время наблюдается тенденция в развитии оборудования для электронно-лучевой сварки крупногабаритных изделий. Это проявляется в создании больших вакуумных камер, герметизации и создании вакуума на отдельных участках свариваемых изделий.

Основными параметрами электронно-лучевой сварки являются: ускоряющее напряжение, ток электронного луча, скорость сварки, размеры фокального пятна, частота и амплитуда поперечных колебаний луча.

К важному достоинству электронно-лучевой сварки относится возможность получения швов с глубоким проплавлением, так называемых "кинжальных" (узких и глубоких), и сваривать за один рабочий ход детали толщиной до 100 мм. Этот метод сварки применяется в машиностроении в производстве конструкций из нержавеющей и высокопрочных сталей, сплавов на основе алюминия и титана, а также некоторых видов керамики с металлами, тугоплавких металлов и др.

Итак, электронно-лучевая сварка имеет следующие преимущества: высокое качество соединений; малая зона термического влияния и небольшие сварочные деформации; глубокое проплавление металлов; затраты энергии составляют 15...20 % от затрат энергии при сварке под флюсом.

4. Конструктивно-технологические характеристики и условные обозначения сварных соединений

Сварным соединением называется неразъемное соединение,

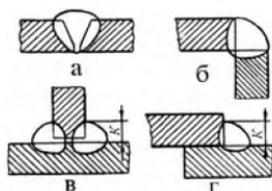


Рис. 28. Виды сварных соединений

выполненное с помощью сварки. Сварные соединения могут быть стыковыми, угловыми, тавровыми и нахлесточными. Стыковое соединение - это сварное соединение двух элементов, расположенных на одной поверхности или в одной плоскости (рис. 28 а). Угловое соединение - это сварное соединение двух элементов, расположенных под прямым уг-

лом и сваренных в месте примыкания их краев (рис. 28 б). Тавровое соединение – это сварное соединение, в котором к боковой поверхности одного элемента примыкает под прямым углом и приварен торцом другой элемент (рис. 28 в). Нахлесточное соединение – это соединение, в котором свариваемые элементы расположены параллельно и частично перекрывают друг друга (рис. 28 г).

Сварной шов – это участок сварного соединения, образовавшийся в результате кристаллизации расплавленного металла сварочной ванны. Сварочная ванна – это часть сварного шва, находящаяся при сварке в жидком состоянии. Металл подвергающихся сварке деталей называется основным металлом. Металл, предназначенный для введения в сварочную ванну в дополнение к расплавленному основному, называется присадочным металлом. Сплав, образованный переплавленным основным и наплавленным металлами или только переплавленным основным металлом, называется металлом шва.

При соединении деталей большой толщины перед сваркой производится механическая обработка их кромок с соблюдением требований ГОСТа на конструктивные элементы. К конструктивным элементам подготовленных и собранных под сварку деталей, например, стыкового соединения, относятся (рис. 29 а): притупление кромок (с), зазор (b) и угол скоса кромок (β). Придание кромкам необходимой формы называется разделкой кромок, а угол между скошенными кромками – углом α разделки кромок.

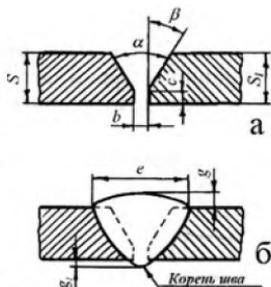


Рис. 29. Стыковое сварное соединение

К конструктивным элементам сварного шва стыкового соединения (рис. 29 б) относятся: ширина шва (e), усиление шва (g), усиление корня шва (g_1). Усиление шва – часть металла шва, возвышающаяся над поверхностью свариваемых деталей. Часть сварного шва, наиболее удаленная от его лицевой поверхности, называется корнем шва. К конструктивным элементам угловых швов в тавровых и нахлесточных соединениях относится катет шва – К (см. рис. 28 в, г). Сваривать можно элементы с одинаковыми и с

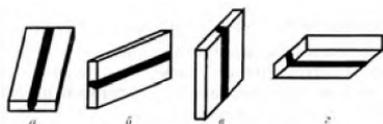


Рис. 30. Положение шва в пространстве

разными толщинами (S и S_1) (рис. 29 а).

В зависимости от положения в пространстве (рис. 30) швы подразделяют на нижние (а), горизонтальные (б), вертикальные (в) и потолочные (г) (верхние).

По протяженности различают непрерывные и прерывистые швы. Непрерывный шов - это сварной шов без промежутков по его длине, прерывистый - с промежутками по длине. Прерывистые швы, например, тавровых соединений подразделяют на цепные и шахматные. Цепной прерывистый шов - это двусторонний прерывистый шов, у которого промежутки расположены по обеим сторонам стенки один против другого. Шахматный прерывистый шов - это двусторонний прерывистый шов, у которого промежутки на одной стороне стенки расположены против сваренных участков шва с другой стороны.

По числу слоев сварные швы могут быть однослойными и многослойными. Слой - это часть металла сварного шва, которая состоит из одного или нескольких валиков, располагающихся на одном уровне поперечного сечения шва. Валик - это металл, наплавленный или переплавленный за один рабочий ход.

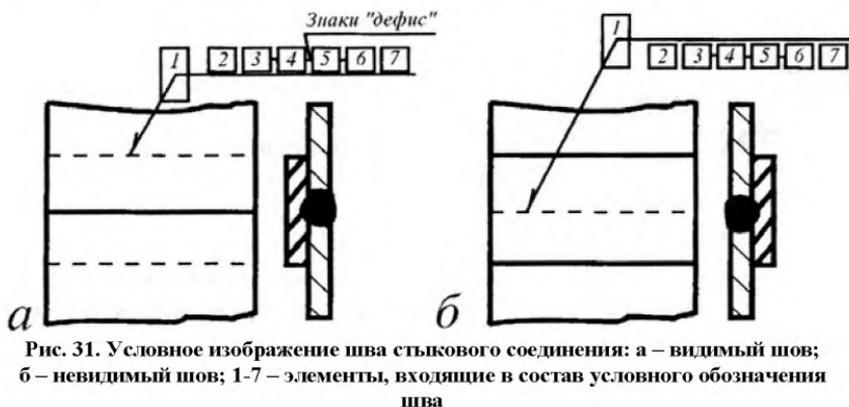


Рис. 31. Условное изображение шва стыкового соединения: а - видимый шов; б - невидимый шов; 1-7 - элементы, входящие в состав условного обозначения шва

Условные изображения или обозначения швов сварных соединений регламентированы ГОСТ 2.312-72, согласно которому видимые швы независимо от способа сварки условно изображают на чертежах сплошными основными линиями, а невидимые швы - штриховыми линиями (рис. 31).

Условные обозначения стандартного шва включают в себя следующие элементы.

1. Вспомогательные знаки:

 - шов выполняется при монтаже изделия,

 - шов выполняется по замкнутой линии.

2. ГОСТ на конструктивные элементы сварного соединения в зависимости от толщины свариваемого материала и способа сварки:

ГОСТ 5264-80 - для ручной дуговой сварки, ГОСТ 14771-76 - для дуговой сварки в защитных газах и т.д.

3. Буквенно-цифровое обозначение шва в зависимости от толщины соединяемых деталей и способа сварки, например: С2 - стыковое соединение; Т3 - тавровое соединение; Н1 - нахлесточное соединение; У2 - угловое соединение.

4. Условное обозначение способа сварки: Р - ручная электродуговая; Г - газовая; А - автоматическая сварка под флюсом без применения подкладок, подварочного шва и т.д.; П - полуавтоматическая сварка под флюсом; А₃ - автоматическая сварка в защитных газах; Э_л - электронно-лучевая сварка; Л₃ - лазерная сварка; У₃ - ультразвуковая сварка и т.д..

5. Знак  и размер катета шва в мм.

6. Знак протяженности шва:

/ - шов прерывистый с цепным расположением свариваемых участков, Z - шов прерывистый с шахматным расположением свариваемых участков,  шов по незамкнутой линии.

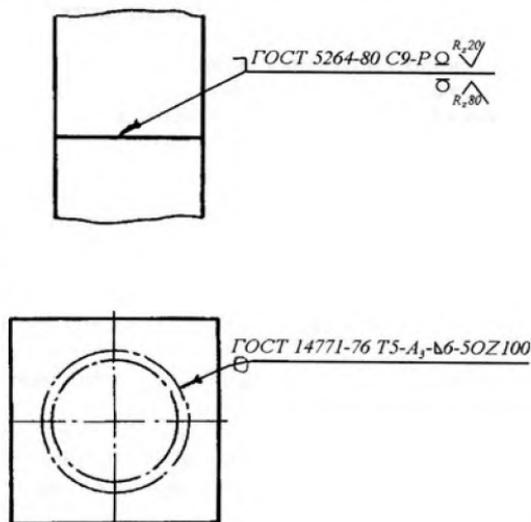


Рис. 32. Примеры условного обозначения шва на чертеже: а - шов стыкового соединения с криволинейным откосом одной кромки, двусторонний, выполненный ручной электродуговой сваркой при монтаже изделия, усиление снято с обеих сторон; параметры шероховатости шва: с лицевой стороны $R_z=80$ мкм; б - шов таврового соединения без скоса кромок, двусторонний, прерывистый, с шахматным расположением участков шва, выполненный автоматической дуговой сваркой в защитных газах с катетом шва 6 мм по замкнутой линии

7. Вспомогательные знаки:

$\underline{\bigcirc}$ - усиление шва снять;

$\underline{\bigcirc}$ - наплавки и неровности шва обработать с плавным переходом к основному металлу;

$\sqrt{R_{z,30}}$ - параметр шероховатости обработанной поверхности (30 мкм).

Примеры условных обозначений швов сварных соединений на чертежах приведены на рис. 32.

5. Изготовление сварных узлов и конструкций авиационно-космической техники

5.1. Сборка-сварка корпусов летательных аппаратов

Все герметичные отсеки ЛА условно можно разделить на две группы: "сухие" и "мокрые". К первой группе можно отнести рабочие отсеки орбитальных станций, спускаемые аппараты (СА) пилотируемых космических кораблей и автоматических космических аппаратов (КА), приборные отсеки ЛА. Ко второй группе относятся различного типа и назначения баки-ёмкости ЛА.

Силовая оболочка корпуса СА (рис. 33) изготавливается из свариваемых алюминиевых сплавов. В зависимости от формы СА

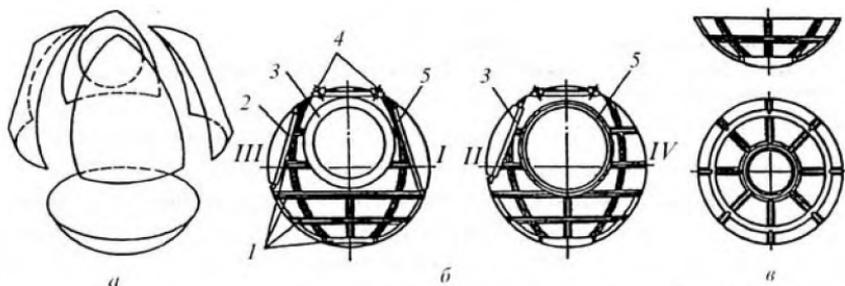


Рис. 33. Схема технологического членения конструкции корпуса СА КА «Ресурс-Ф2»: а – оболочка; б – силовой каркас; в – силовое днище; 1 – силовые шпангоуты; 2 и 5 – силовые шпангоуты люка; 3 – силовой шпангоут люка парашютного контейнера; 4 – фланцы крепления системы разделения

(сфера, конус и др.) элементы оболочки штампуются и свариваются между собой. Усиливающий оболочку силовой набор приваривается к оболочке точечной сваркой и используется для крепления при-

боров, агрегатов, кабельной сети и полезной нагрузки. В оболочку СА сварены фланцы под иллюминаторы, антенны, узлы для крепления агрегатов снаружи СА. Приборные отсеки (ПО) могут иметь герметичную и негерметичную конструкцию, в них размещают аппаратуру, которую нецелесообразно помещать в СА или агрегатный отсек (АО). Иногда применяют дополнительные ПО в виде контейнеров различной конфигурации, которые крепятся к силовой конструкции. Внутри герметичных ПО поддерживаются условия, необходимые для функционирования приборов.

Требования, предъявляемые к герметичным корпусам, можно разделить на две группы.

Первую группу составляют требования, общие для герметичных корпусов любых КА. Корпус должен обладать необходимым запасом прочности с учетом того, что в процессе эксплуатации он постоянно нагружен внутренним давлением содержащейся в нем газовой среды. Заданный уровень герметичности должен сохраняться на протяжении всего полета КА. К геометрическим параметрам корпусов предъявляются достаточно жесткие точностные требования: допуск на закрутку стыковочных шпангоутов составляет единицы угловых минут, а допуски на большинство размеров корпусов - 0,01...0,05% от их номинальных значений. Допустимая погрешность расположения фланцев по длине корпуса составляет ≤ 1 мм, а неплоскостность герметично уплотняемых фланцев и шпангоутов $\leq 0,1$ мм.

Во вторую группу входят специфические требования, вытекающие из условий эксплуатации конкретных КА. Например, к герметичным корпусам долговременных орбитальных станций предъявляются повышенные требования в части обеспечения заданной жесткости конструкции и сохранения ее неизменной на протяжении полета. Для корпусов СА характерны достаточно жесткие требования к форме наружной поверхности и смещению центра масс аппарата относительно центра давления, обусловленные особенностями процесса спуска аппарата в атмосфере планеты.

Герметичность корпусов КА обеспечивается выбором рациональных конструкторско-технологических решений. Детали, входящие в состав герметичных корпусов, изготавливают из холодноштампованных листовых и профильных заготовок, материал которых отличается высокой плотностью и малой газовой проницаемостью. Соединение деталей корпусов друг с другом производится

с помощью прочноплотных сварных соединений, что обеспечивает минимальное увеличение массы конструкции.

Основной конструкционный материал, используемый для изготовления герметичных корпусов, - алюминиевые сплавы. В производстве ЛА алюминиевые сплавы составляют около 3/4 доли всех материалов.

Как известно, алюминиевые сплавы разделяются на две основные группы: деформируемые и литейные. Деформируемые алюминиевые сплавы в свою очередь разделяются на неупрочняемые термообработкой и термоупрочняемые.

В сварных конструкциях ЛА получили наибольшее распространение деформируемые алюминиевые сплавы, не упрочняемые термообработкой (АМц, АМг, АМгЗ, АМг5В, АМг6 и др.) и термоупрочняемые (Д19, М40, Д20, ВАД23, В92А, АЦМ и др.), а также алюминий (АД, АД1 и др.). Литейные сплавы в сварных конструкциях ЛА применяются реже.

В производстве ЛА сварку алюминиевых сплавов плавлением осуществляют в основном электродуговыми способами неплавящимися и плавящимися электродами в защитной среде нейтральных газов аргона и гелия. В последнее время все большее применение находит сварка электронным лучом в вакууме.

К одной из проблем сварки алюминия и его сплавов следует отнести наличие (и возможность образования при сварке) тугоплавкого окисла ($T_{пл} = 2323 \text{ К}$). Окисные включения в сварных швах снижают свойства соединений из алюминиевых сплавов и их работоспособность. Источники их появления в сварном шве – окисные пленки на поверхностях стыкуемых элементов и присадочной проволоки. Наличие загрязнений на этих поверхностях увеличивает количество окисных включений в швах.

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

Известно, что на качество сварных швов значительно влияет состояние поверхности присадочной проволоки. Присадочная проволока подготавливается перед сваркой посредством химической обработки, принятой для основного металла. Дополнительная обра-

ботка может быть различной: вакуумная сушка проволоки, химическое или электрохимическое полирование поверхности.

Для дуговой сварки алюминиевых сплавов в среде защитных газов применяют аргон первого состава, гелий или смеси аргона с гелием. При сварке в защитных газах окисная пленка удаляется своеобразным воздействием электрического тока в процессе горения дуги (см. раздел 3.2.5). Разработка схем технологических процессов сборки-сварки герметичных корпусов производится с учетом принятой схемы членения и обеспечения требуемого уровня качества сварных соединений. Выбранный способ сварки, оборудование, технологическая оснастка, порядок операций в технологическом процессе должны обеспечивать высокие технические характеристики сварных конструкций (прочность, герметичность, точность геометрической формы, надежность и др.), а также хорошие экономические показатели (трудоемкость и др.).

Технологическая схема сборки-сварки герметичного корпуса СА космического корабля "Союз" представлена на рис. 34. Она обеспечивает возможность параллельного изготовления верхней и нижней частей колоколообразного корпуса, но далее все сборочно-сварочные операции могут выполняться только последовательно, что предопределяется особенностями конструкции корпуса. Наряду с прямолинейными, кольцевыми и круговыми швами здесь выполняется и сварка по сложным пространственным швам.

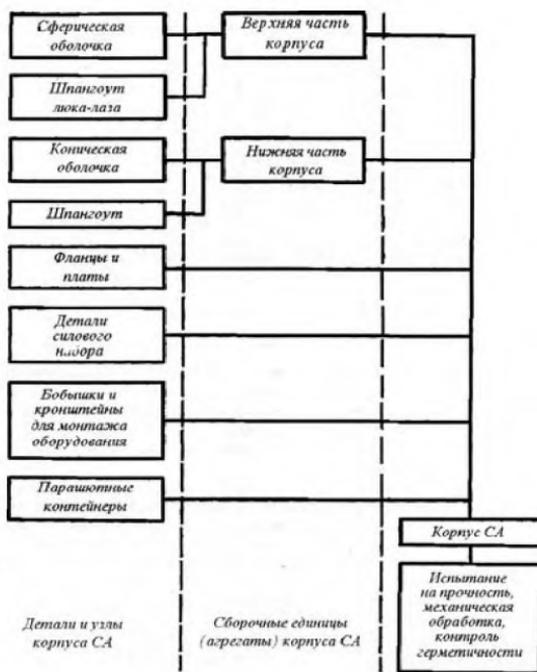


Рис. 34. Технологическая схема сборки-сварки герметичного корпуса СА космического корабля «Союз»

Для стыковых швов, выполняемых аргонодуговой сваркой, при толщине свариваемых кромок $S < 5$ мм смещение их по всей длине шва не должно превышать $0,20 S$ (но не более 0,5 мм), а местное - $0,25 S$ (но не более 1 мм). При $S > 10$ мм допустимое общее смещение кромок не должно превышать $0,10 S$ (но не более 1 мм), а местное - $0,15 S$. Суммарная протяженность участков с местным смещением кромок не должна быть больше 20% от длины шва. Качество подготовки свариваемых поверхностей оценивают сравнением с эталонами и измерением высоты микронеровностей.

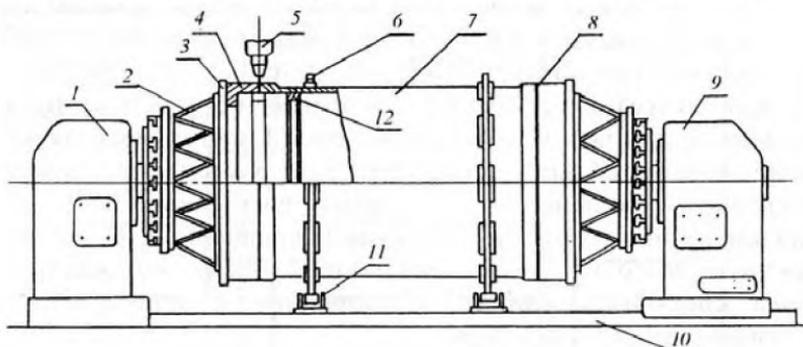


Рис. 35. Схема двухопорной установки для сварки колец: 1 – неподвижная бабка стапеля; 2 – корзина; 3 – переходное кольцо; 4 – торцевой шпангоут; 5 – сварочная горелка; 6 – бандаж; 7 – обечайка; 8 – сварной шов; 9 – неподвижная бабка; 10 – направляющие; 11 – катки; 12 – разжимное кольцо

Для изготовления отдельных сборочных единиц герметичных корпусов используются специальные стелды и технологическая оснастка. Например, установка для сварки кольцевых швов (рис. 35).

Детали сборочных единиц на сборку поступают обычно с технологическими припусками на обработку. Подрезку свариваемых деталей оболочки производят на токарных станках или с помощью фрезерных головок.

После сборки свариваемых деталей в специальных стелдах необходимо обеспечить надежное прижатие свариваемых кромок к подкладным кольцам. Для обеспечения прижатия широко используют гидropriжимы клавишного типа.

Для качественного исполнения кольцевых швов широко используются разжимные кольца (рис. 36). Разжимное кольцо состоит из четырех-шести секторов, на которых закреплены резьбовые тяги,

Сборка-сварка фланцев и оболочки корпуса выполняются как по круговым стыкам, так и по стыкам произвольной формы. Для автоматической сварки стыков произвольной формы исполь-

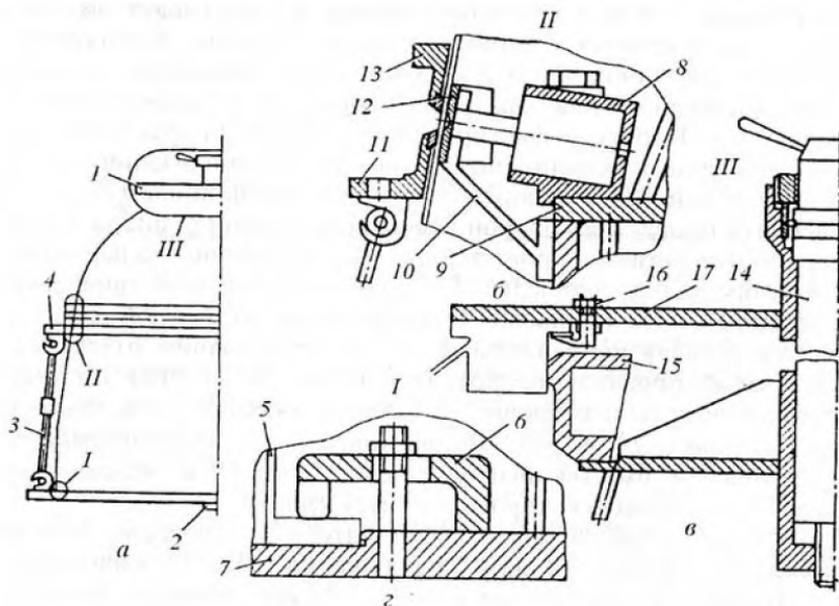


Рис. 37. Схема приспособления для сборки-сварки сферической и конической оболочек корпуса СА

а - общая компоновка приспособления; б - схема прижима свариваемых кромок; в - схема крепления верхней и нижней частей приспособления; г - схема установки и крепления конической оболочки; 1, 4 - верхняя и нижняя части приспособления соответственно; 2 - центрирующая шайба; 3 - резьбовые стяжки; 5 - коническая оболочка; 6, 16 - прижимы; 7 и 17 - верхнее и нижнее основания соответственно; 8 - гидроцилиндры; 9, 10 - кронштейны; 11, 13 - нижнее и верхнее бандажные кольца соответственно; 12 - сектор гибкого подкладного кольца; 14 - центральный болт; 15 - центрирующая шайба

зуют специальные установки с числовым программным управлением (ЧПУ), обеспечивающие управление движением сварочной головки вдоль стыка и расстоянием между электродом и свариваемыми поверхностями.

5.2. Сборка-сварка баков-ёмкостей летательных аппаратов

В зависимости от назначения конструкции баков многообразны. Выбор формы бака диктуется в основном необходимостью создания ЛА с наиболее плотной компоновкой (рис. 38). Кроме то-

го, при этом учитываются достоинства и недостатки каждой формы.

По функциям, выполняемым в конструкции аппаратов, баки могут быть несущими, когда они являются корпусом аппарата, формирующим его обводы и воспринимающим нагрузки, приходящиеся на корпус аппарата, и подвесными, когда они помещаются внутри несущего корпуса аппарата. В КА последние значительно распространены. По конструкции стенок баки могут быть с гладкими листовыми стенками без силового набора или с силовым набором сборной конструкции, со стенками из монолитных, например, вафельных, или только с продольным набором панелей.

Требования к материалам баков и ёмкостей, особенно для КА, весьма высоки и иногда даже противоречивы. Они должны обладать высокой прочностью и жесткостью, удельной прочностью, противостоять как высоким, так и криогенным температурам, должны быть коррозионно-стойкими по отношению к компонентам топлива, иметь высокую плотность (непроницаемость) для обеспечения герметичности по стенкам, что особенно важно для ёмкостей, работающих в глубоком вакууме. В то же время они должны обладать приемлемыми технологическими свойствами: пластичностью (штампуемостью), свариваемостью, хорошей обрабатываемостью резанием и т.д. Наиболее распространенными материалами, используемыми для изготовления баков и ёмкостей являются деформируемые сплавы (АМг3М, АМг6, АМг6М, Д16АМ, Д20, АК-6, АК-8, В95АМ, 1201 и др.), коррозионно-стойкие и высокопрочные стали (30ХГСНА, 12Х18Н9Т, 20Х1364Г9, 12Х18Н10Т, 15Х18Н12С4ТЮ, ВНС-2 и др.), титановые (ОТ-4, ОТ4-1, ВТ-6, ВТ-14 и др.), иногда магниевые сплавы (МА1-М, МА8-М), и др. В последнее время для ёмкостей высокого давления начинают находить применение никелевые (ХН60ВТ, ХН77ТЮР), молибденовые и бериллиевые сплавы.

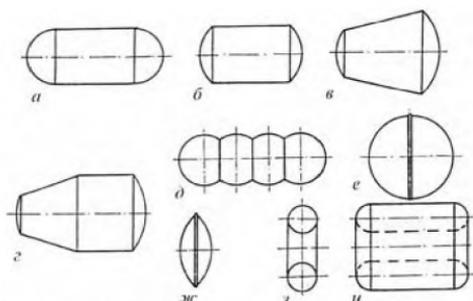


Рис. 38. Формы баков: а, б – цилиндрические; в – конусные; г – сложной формы; д – ячеистый бак; е – сферический; ж – чечевичеобразный; з – торовый; и – кольцевой

Общими требованиями к бакам и ёмкостям являются: высокая прочность и жесткость, особенно для несущих баков и ёмкостей высокого давления, вибропрочность и сохранение эксплуатационных качеств при циклических нагрузках; минимальная масса; герметичность не только по швам, но и самих материалов (герметичность по стенкам); стойкость против агрессивного воздействия хранящихся в них веществ; сохранение эксплуатационных качеств в широком диапазоне температур, иногда при циклическом температурном воздействии; простота и технологичность конструкции; обеспечение требуемой точности изготовления, назначенного ресурса. Все эти и другие требования должны обеспечиваться как самой конструкцией баков и ёмкостей, так и соответствующей технологией и принятой системой контроля и испытаний.

Общая схема изготовления баков и ёмкостей состоит из этапа изготовления деталей и этапа сборки. Характерные детали типовых конструкций баков и ёмкостей можно разделить по назначению на две группы. К первой группе относятся детали, входящие в силовую схему (корпус) бака: обечайки, шпангоуты, стыковочные кольца, стрингеры, днища, соединительные юбки, детали подвески баков. Ко второй группе относятся детали арматуры, обеспечивающие заправку бака или ёмкости и надёжную подачу компонента: детали заборных устройств, датчиков уровней жидкости, клапанов; кронштейны, фланцы, заборники, штуцера.

Днища являются наиболее специфичными и характерными деталями почти всех типов баков и корпусов. По форме обводов днища могут быть плоскими, сферическими, эллиптическими, параболическими, куполообразными и полуторовыми с бортами различной формы и без бортов. Большинство днищ имеет отверстия с отбортовками для приварки деталей арматуры.

По диаметру различают малогабаритные (до 300 мм), среднегабаритные (300...1000 мм) и крупногабаритные (более 1000 мм) днища. По составу исходных заготовок различают простые цельноформованные (цельноштампованные) и сложные штамповарные конструкции днищ, сварные из отдельных сегментов (лепестков), число которых для крупных днищ доходит до 15...20 (рис. 39). Оболочки днища баков целесообразно изготавливать из одного листа (рис. 39 а). При отсутствии листов с необходимыми габаритными размерами их приходится делать составными (рис. 39 б, в, г).

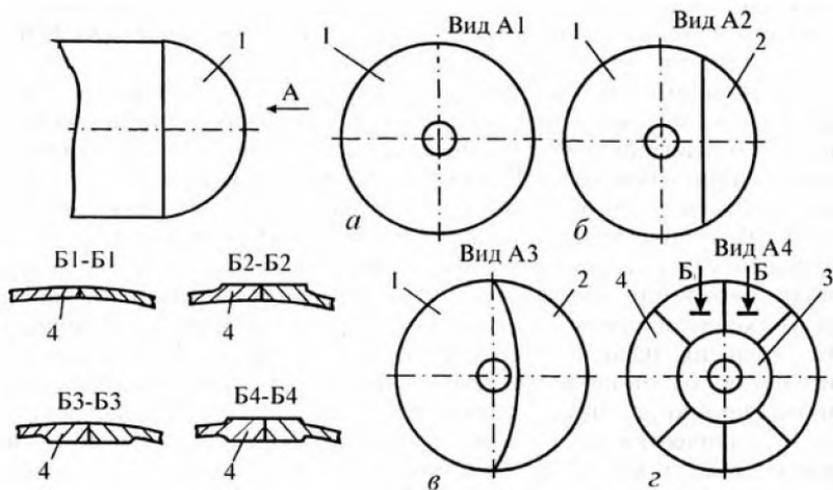


Рис. 39. Днища баков: 1 – днище; 2 – часть днища; 3 – полусная часть; 4 – лепесток; Б1-Б1, Б2-Б2, Б3-Б3, Б4-Б4 – варианты сварных соединений

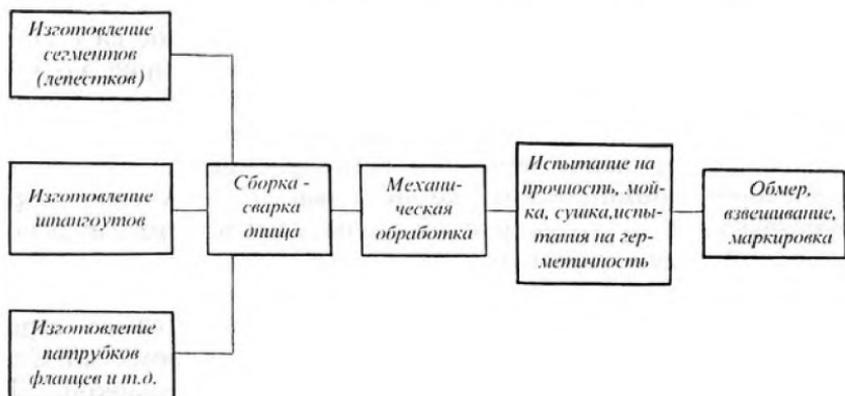


Рис. 40. Схема типового технологического процесса изготовления днищ

Схема типового технологического процесса изготовления днищ представлена на рис. 40.

Стыковочные и промежуточные шпангоуты корпусов баков предназначаются для стыковки обечаек с днищами и с соединительными юбками. Они могут изготавливаться либо из катаных листов, либо из прессованных профилей на специальных профилегибочных станках. Шпангоуты значительных диаметров (более 1500 мм) обычно изготавливают из сегментов с последующей сваркой, отжигом и калибровкой. Промежуточные шпангоуты обычно

подаются на сборку обечаек, а стыковочные - на общую сборку баков.

Сварка сегментов днищ между собой и со шпангоутами, приварка патрубков и фланцев производится автоматической дуговой сваркой в среде защитных газов (аргоне, реже в гелии). Сварные швы должны иметь прочность не менее 0,9 от прочности основного материала.

Подготовка узлов из алюминиевых сплавов включает в себя химическую обработку (травление, промывка, сушка) с целью удаления с поверхности узлов загрязнений и достаточно толстых окисных пленок. Непосредственно перед сваркой свариваемые кромки узлов зачищают механическим способом (металлической щеткой, шабером, фрезой) на ширине не менее 20 мм от торца или края разделки. В отдельных случаях для удаления окисных пленок используются флюсы на основе хлористых солей калия и бария в виде суспензий, которые наносятся на свариваемые кромки. Присадочная проволока также проходит предварительную химическую обработку для удаления окисных пленок.

Шпангоут и оболочку днища собирают в специальном приспособлении с учетом специальных меток плоскостей стабилизации на шпангоуте и приспособлении. Оболочку днища закрепляют относительно шпангоута с помощью прижимной "корзины" и кольца. В приспособлении свариваемые кромки узлов прижимаются к специальной подкладке, имеющей канавку определенных размеров. Правильное формирование корня шва и получение хорошей структуры шва и околошовной зоны определяется в основном теплофизическими свойствами материала и условиями теплоотвода, кото-

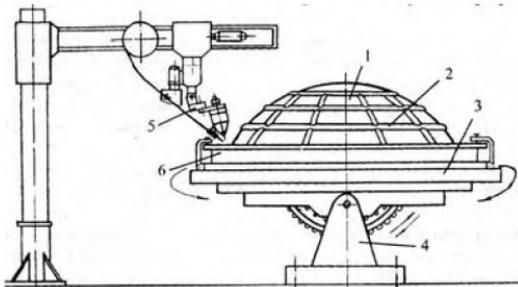


Рис. 41. Схема установки для сварки полушеры со шпангоутом: 1 - днище; 2 - приспособление; 3 - стол манипулятора; 4 - манипулятор; 5 - сварочный автомат; 6 - шпангоут днища

рый можно регулировать с помощью подкладок. Затем проводится проверка смещения кромок относительно середины канавки подкладки и зазора между свариваемыми кромками. Стыки в некоторых случаях прихватываются ручной сваркой. После прихватки контролируется правильность сборки.

Сварка днищ производится на специализированных стандах (рис. 41). В состав станда входит установка для автоматической аргонодуговой сварки и манипулятор. На манипуляторе устанавливается технологическая оснастка со свариваемыми узлами.

Качество сварных швов контролируется визуально. После зачистки сварных швов проводится рентгеновский контроль. Механическая обработка шпангоута днища осуществляется на токарно-карусельных и фрезерных станках с целью обеспечения последующей стыковки узлов.

Отверстия для фланцев и патрубков вырезают и растачивают согласно карте эскизов для каждого днища. Вырезку отверстий проводят вручную (резаком) при толщине оболочки не более 2...3 мм, или на расточных станках при большей толщине стенки.

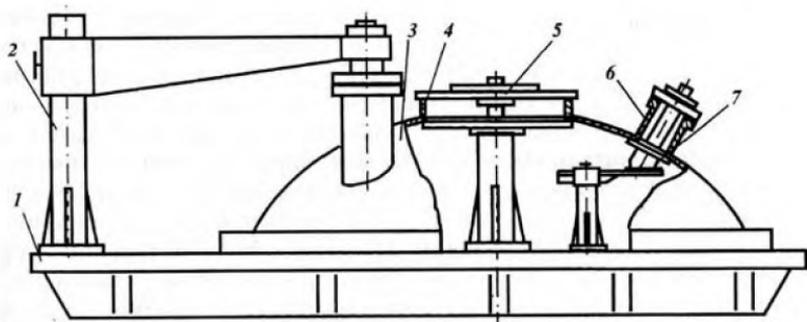


Рис. 42. Схема установки фланцев и патрубков на днище на координатной плите: 1 – координатная плита; 2 – стойка приспособления; 3 – днище; 4 – фланец; 5 – приспособление для установки фланца; 6 – патрубок; 7 – приспособление для установки патрубка

Установку фланцев и патрубков на днище производят на координационной плите по эскизу разметки (рис. 42). На координационную плиту вначале выставляют приспособления для сборки днища с патрубками и фланцами согласно схеме расположения стоек. После подгонки, прихватки и контроля сборки патрубков и фланцев производится приварка их к днищу на специальных установках.

Затем после разметки и установки арматуры (кронштейнов и др.) выполняют прихватку, после чего проводится контроль сборки и приварка ручной аргонодуговой сваркой. Контроль качества сварки осуществляется путем испытаний на прочность (гидро- или пневмоиспытания) и герметичность на специальных стандах. Рабо-

чее давление выдерживается в пределах $P_{ис} = (1,15...1,25)P_{раб}$, где $P_{раб}$ - максимальное рабочее давление в ёмкости.

Испытательное давление выдерживается в течение 0...15 мин. Контроль осуществляется по манометру, спад давления не допускается.

Испытания на герметичность проводят в вакуумных камерах или негерметичных камерах методом натекания при атмосферном давлении. Рабочим газом является гелий или гелиево-воздушная смесь. В качестве контрольного оборудования используют теческатели типа ПТИ-7, ПТИ-10. При относительно невысоких требованиях к герметичности применяют метод дисперсных масс.

Обечайки являются одним из основных элементов цилиндрических, конических и сферических баков (рис. 43). Обечайки изготавливаются из листовых заготовок гибкой прокаткой. После этого производится сварка продольного шва полученного полуфабриката. Во многих случаях после формообразующих и сварочных операций вводят операцию химического фрезерования с целью облегчения обечайек и образования усиления по сварным швам. Это обеспечи-

вает равнопрочность конструкции по стенкам и швам. На этапе предварительной сборки (если бак состоит из нескольких обечайек) в обечайки устанавливают поперечные силовые элементы (шпангоуты, перегородки, кронштейны и т.д.). Сборка производится в специальных стапелях вследствие малой жесткости обечайек. На рис. 44 представлены компоновочные схемы стенов для сварки продольных (а) и кольцевых (б) швов цилиндрических и конических обечайек. После контроля швов и приварки всех арматурных

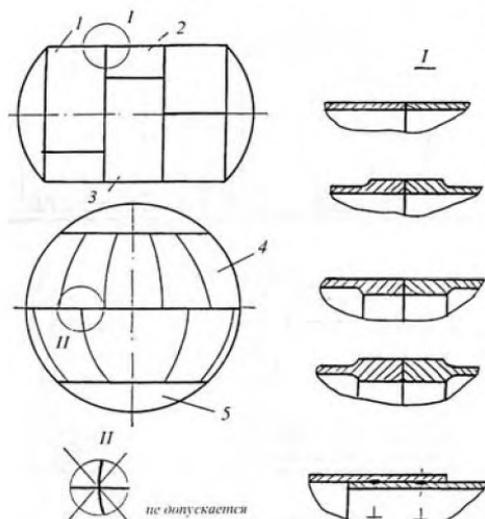


Рис. 43. Обечайки баков: 1 – кольцо; 2 и 3 – часть кольца; 4 – лепесток; 5 – полусная часть

деталей обечайка поступает на сборку бака.

Стыковочные юбки (обечайки) служат для стыковки баковых отсеков с другими. По конструкции они представляют собой цилиндрические (редко конические) короткие сборочные обечайки, подкрепленные стрингерами и закапчивающиеся стыковочными шпангоутами. Технология изготовления юбок аналогична технологии изготовления корпусных обечайек, добавляются лишь (вследствие конструктивных отличий) прорезка окон или лючков, выштамповка различных местных усложнений, сверление отверстий и клепка со стыковыми шпангоутами. После сборки юбки подаются на общую сборку баков.

Детали арматуры, установочные и соединительные детали, служащие для заправки и подачи компонентов топлива, а также для соединения отдельных элементов силовой схемы и крепления различных коммуникаций, приборов и устройств (фланцы, штуцера, кронштейны, заборники, уголки, накладки, горловины, воронкогасители, патрубки и т.п.) относятся в большинстве случаев к жестким деталям общемашиностроительного типа. Они обычно изготавливаются из тех же материалов, что и основные элементы баков-

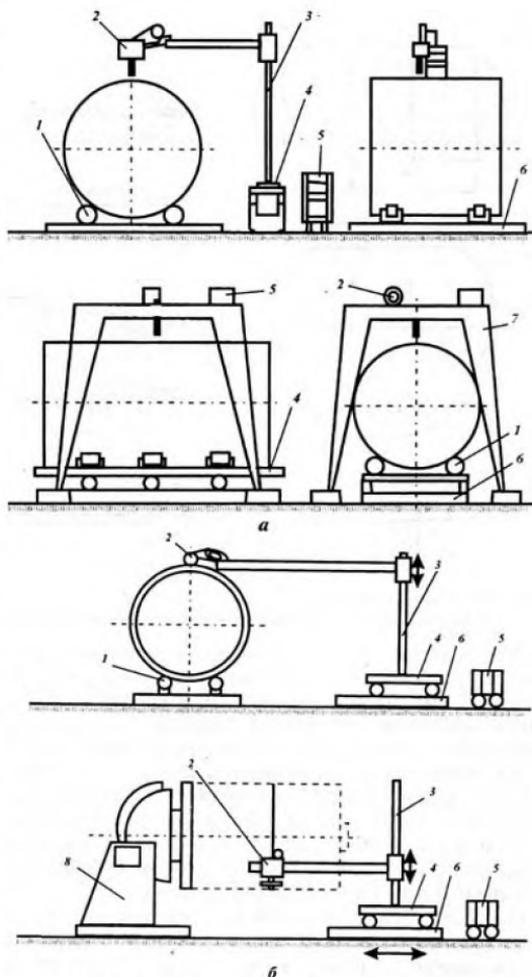


Рис. 44. Компонентные схемы стенов для сварки прямолинейных и кольцевых цилиндрических и конических обечайек: 1 — манипулятор роликовый; 2 — сварочный автомат; 3 — колонна с консолью; 4 — тележка; 5 — источник питания; 6 — направляющие; 7 — портал; 8 — манипулятор

конструкций. Ряд деталей этой группы получают методами холодной штамповки из листовых, трубчатых и профильных заготовок; большинство же из них изготавливают механической обработкой.

После изготовления отдельных элементов и деталей баков и некоторых сборочных единиц: обечаек, днищ, стыковочных юбок, стыковочных шпангоутов - они подаются на общую (агрегатную) сборку баков. С целью сокращения цикла изготовления и общей сборки все детали арматуры, установочные и соединительные детали должны по возможности собираться и привариваться к основным элементам баков на стадии узловой сборки.

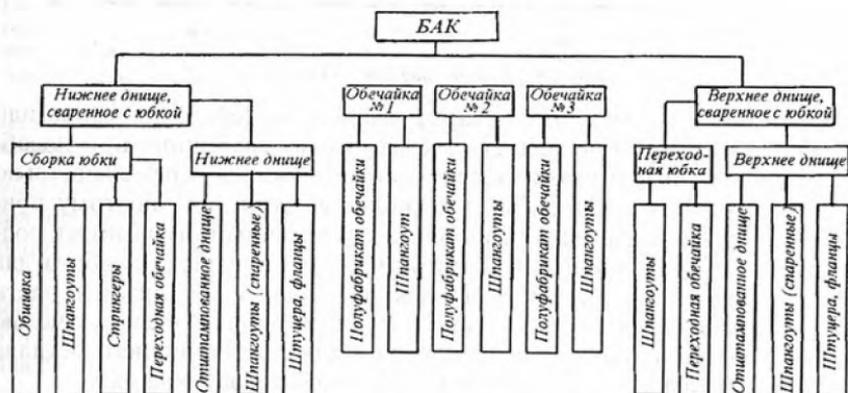


Рис. 45. Схема сборки типовой конструкции топливного бака ЛА

В качестве примера рассмотрим сборку цилиндрических (конических) металлических баков. На рис. 45 представлена схема сборки типовой конструкции цилиндрического (конического) бака. Как правило, общая сборка таких баков производится в специальных приспособлениях - стапелях, предназначенных для точного базирования собираемых элементов относительно друг друга. Базами при установке в приспособление обечаек и днищ часто являются внутренние поверхности, что обеспечивает лучшую соосность при сборке. В ряде случаев в сборочном стапеле собираемые элементы после базирования только прихватываются в нескольких точках, что упрощает конструкцию стапеля, а сварка производится в более простых поддерживающих приспособлениях, обеспечивающих вращение уже прихваченных элементов для осуществления кольцевой автоматической сварки в так называемых сварочных стендах. На рис. 46 представлена конструктивная схема сварочного стенда.

Стенд для сварки похож на токарный станок. Он имеет переднюю и заднюю (подвижную) бабки 1, 7. На план-шайбе 2 с помощью разжимных центрирующих устройств 3 (подвижных в радиальном направлении секторов) осуществляется закрепление свариваемых узлов. План-шайба опи-

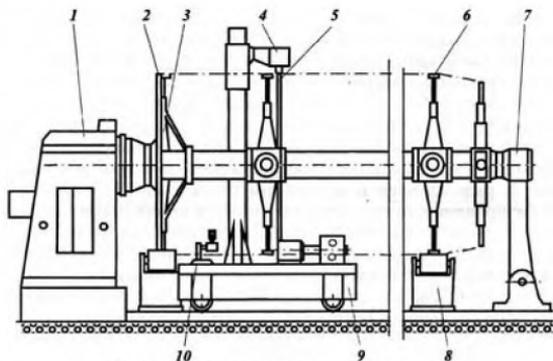


Рис. 46. Схема сварного стенда

рается на опорные ролики люнетов 8 для исключения нагрузки от их веса на вал. Два симметрично расположенных люнета 8 предотвращают провисание свариваемого агрегата.

Подкладное кольцо 5 служит для формирования проплава сварного шва. Кольцо разъемное, регулируемое для обеспечения точной и плотной установки его в месте стыка собираемых обечаек. Подкладное кольцо точно фиксируется относительно зоны сварки за счет базирования по торцевым поверхностям разжимных колец 6, предварительно установленных на свариваемые элементы бака и исключающих овальность стыкуемых под сварку элементов (обечаек, днищ или юбок). После сварки последнего элемента бака сварочные приспособления (подкладные и разжимные кольца) выносятся через специально предусмотренный в днище бака технологический люк, поэтому приспособления выполнены разборными. Сварочный стенд имеет подвижный портал 9, в верхней части которого закреплена головка для автоматической аргодуговой сварки 4. В нижней части портала крепится фрезерная головка 10, служащая для удаления припуска по длине обечаек с целью обеспечения требуемого размера бака.

По завершении сварки бака производится зачистка проплавов сварных швов, контроль их качества, монтаж внутрибаковых устройств (тоннельных и дренажных труб, перегородок и т.п.). Затем бак подвергается испытаниям.

Сборка-сварка сферических баков имеет свои специфические особенности, так как ёмкости данной группы, как правило, предназначены для работы под высоким давлением (до $3 \cdot 10^4$ кПа и

выше). Эту группу ёмкостей отличает большая толщина стенок (10...15 мм), относительная простота конструкции (наличие штуцеров с клапаном и кронштейнов крепления), высокие требования к прочности и герметичности сварных швов. Материалами для них служат высокопрочные сплавы и стали, иногда титановые сплавы. Полусферы часто изготавливают методом горячей объемной штамповки заодно со штуцерами и сваривают между собой через промежуточный элемент - кольцо (шпангоут), составляющий часть сферического обвода бака. Сварные швы подвергают индукционному отжигу, зачистке и выглаживанию, после чего производится окончательная термообработка (закалка, двухкратный отжиг и т.д.). Все сварные швы подвергаются рентгеноконтролю.

5.3. Сварка узлов авиационных газотурбинных двигателей

Детали авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) испытывают воздействие высоких температур, большие механические нагрузки, вибрацию, подвергаются газовой коррозии, истиранию, малоцикловой усталости вследствие неоднократного повторения цикла работы на взлете и при посадке. В силу этого для их изготовления широко используются жаропрочные материалы различных классов, в частности, жаропрочные никелевые и титановые сплавы, тугоплавкие металлы и сплавы, различные стали.

В авиационном двигателестроении для соединения этих материалов используются различные виды сварки. Все большее применение получает электронно-лучевая сварка (ЭЛС). Наиболее широко процесс ЭЛС применяют при изготовлении роторных конструкций, корпусных деталей и валов



Рис. 47. Основная номенклатура узлов ГТД, свариваемых электронным лучом

ГТД (рис. 47), где требуется соединять практически полностью механически обработанные детали с высокой степенью точности.

Многие зарубежные фирмы широко применяют электронный луч для изготовления деталей и узлов авиационных двигателей из тугоплавких и химически активных материалов, из жаропрочных сплавов и высокопрочных сталей. При этом, как правило, приме-

няют установки мощностью до 30 кВт с ускоряющим напряжением (60—175 кВ).

Так использование ЭЛС при изготовлении роторов турбин из разнородных материалов позволило английской фирме Rover Co. значительно снизить их стоимость. На рис. 48 показана схема сварки ротора турбины. Диск 1 ротора выполняют кованным из углеродистой стали, а лопатки 3 — литыми из жаростойкого сплава. Лопатки отливают вместе с ободом 2, а затем при разогреве насаживают на диск. Сварку осуществляют при вертикальном положении ротора одновременно с двух сторон горизонтальными электронными лучами 5. Для предотвращения перекрытия швов и образования дефектов в теле диска и обода выполняют кольцевую проточку 4. Возможна и односторонняя сварка, которая позволяет избежать изготовления проточки, однако при этом требуется значительное увеличение мощности пучка электронов и точности выполнения процесса сварки.

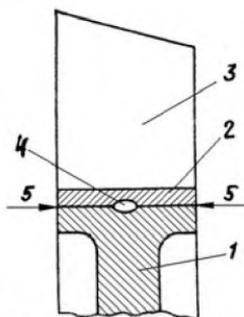


Рис. 48. Схема сварки ротора турбины

Сварку осуществляют при вертикальном положении ротора одновременно с двух сторон горизонтальными электронными лучами 5. Для предотвращения перекрытия швов и образования дефектов в теле диска и обода выполняют кольцевую проточку 4. Возможна и односторонняя сварка, которая позволяет избежать изготовления проточки, однако при этом требуется значительное увеличение мощности пучка электронов и точности выполнения процесса сварки.

Сварка плавлением ряда используемых в неразъемных узлах и конструкциях авиационных ГТД материалов, а также большого числа применяемых их сочетаний связана со значительными трудностями либо не обеспечивает требуемого качества соединений, либо невозможна (например, керамики с металлами и сплавами). В этих случаях решением проблем соединения может быть применение тех или иных способов сварки давлением.

Большими возможностями в решении задач авиадвигателестроения в сфере создания неразъемных соединений элементов конструкций обладает метод диффузионной сварки в вакууме (ДСВ). Технологии ДСВ, разработанные в Самарском государственном аэрокосмическом университете, используются при изготовлении ряда ответственного назначения узлов ГТД, например, при изготовлении биметаллических роторов турбин и компрессоров малоразмерных авиационных ГТД и турбоагрегатов.

Эти узлы состоят из двух деталей — рабочих колес и валов сплошного и полого исполнения. Рабочие колеса турбин, температура ($T_{экс}$) нагрева которых при работе достигает 850...950 °С, выполняются из литейных жаропрочных никелевых сплавов ЖС6К, ЖСЗДК, ВЖЛ12У и др.); рабочие колеса компрессоров ($T_{экс} =$

400...450 С°) - из жаропрочных титановых сплавов (ВТЗ-1 и др.). Хвостовики роторов, устанавливающиеся в подшипнике скольжения и нагревающиеся до значительно меньших температур, изготавливаются из износостойких сталей (40Х, 45Х и др.)

Диффузионное соединение используемых в роторах сочетаний материалов, осуществляется через тонкие барьерные прослойки (фольги), которые предотвращают охрупчивание соединений жаропрочных сплавов и сталей через прослойки никеля толщиной

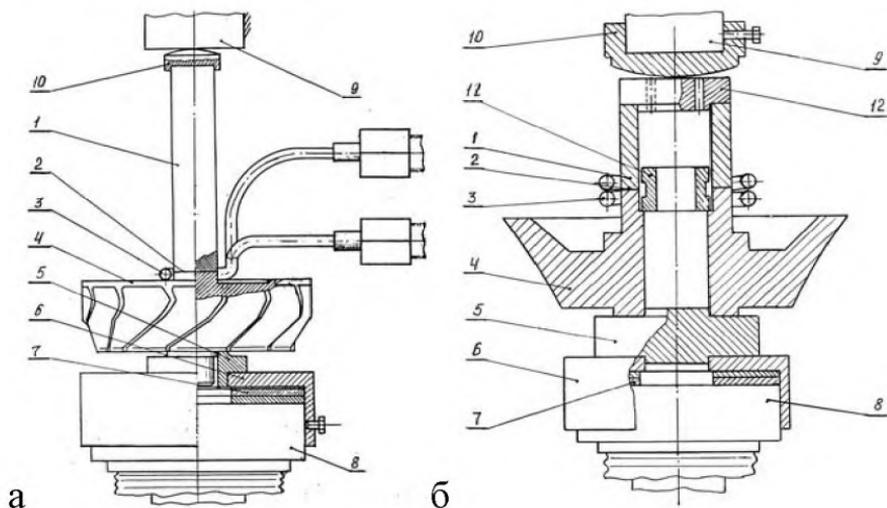


Рис. 49. Оснастка для диффузионной сварки рабочих колес роторов турбин с валами сплошного сечения: 1 – вал ротора турбины, 2 – никелевая прокладка, 3 – индуктор, 4 – рабочее колесо ротора турбины, 5 – опорная втулка, 6 – центрирующий стакан, 7 – регулировочные прокладки, 8 – шток силопровода, 9 – упор вакуумной камеры, 10 – сферический наконечник

50-100 мкм, титановых сплавов со сталями через двойную прослойку - ванадия толщиной 25 мкм и меди 50 мкм. Сварка роторов производится на серийных установках типов А 306.08, УДС-2 с объемом вакуумных камер около 40 дм³ с применением сборочно-сварочной оснастки. Нагрев соединяемых деталей производится токами высокой частоты, вырабатываемыми входящими в состав сварочных комплексов ВЧ - генераторами (мощность – 60 кВт, частота – 70 кГц).

На рис.49 а приведена оснастка, используемая при диффузионной сварке роторов турбин с валами сплошного сечения.

Рабочее колесо турбины 4 монтируется в вакуумной камере на штоке силового привода 8 с помощью установочных деталей сборочного приспособления – опорной втулки 5 и центрирующего стакана 6, обеспечивающих его соосность со штоком 8 и индуктором 3, а также размещение свариваемого стыка в рабочей зоне индуктора. Вал ротора 1 устанавливается на свариваемый торец колеса ротора 4 через никелевую прокладку 2, центровка его относительно свариваемого торца колеса контролируется визуально. Равномерная передача усилия сжатия на свариваемый контакт достигается за счет надетаго на вал ротора сферического наконечника 10. Положение свариваемого стыка относительно индуктора регулируется путем изменения толщины пакета сменных прокладок 7.

Для сборки-сварки рабочих колес турбин и компрессоров с валами трубчатого вида применяются технологические центрирующие втулки с проточками (рис. 49 б), обеспечивающими возможность свободного пластического формоизменения внутренней приконтактной зоны соединения, что является важным условием получения доброкачественных соединений.

Применение ДСВ при изготовлении роторов позволило отказаться от механических способов соединения их деталей и за счет этого значительно снизить массогабаритные характеристики этих узлов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Технология и оборудование сварки плавлением / под ред. Г.Д. Никифорова: учебник для студентов вузов. – М.: Машиностроение, 1978. - 327 с.
2. Теория, технология и оборудование диффузионной сварки: учебник для вузов / [В.А. Бачин и др.]. – М.: Машиностроение, 1981. - 243 с.
3. Дударь, Л.А. Сборочно-сварочные работы в производстве летательных аппаратов: учеб. пособие / Л.А. Дударь, Ф.И. Китаев, М.Д. Рудман. – Куйбышев: КуАИ, 1983. - 96 с.
4. Фетисов, Г.П. Сварка и пайка в авиационной промышленности: учеб. пособие для авиационных вузов / Г.П. Фетисов. – М.: Машиностроение, 1983. - 320 с.
5. Барвинок, В.А. Сборочные, монтажные и испытательные процессы в производстве летательных аппаратов / В.А. Барвинок [и др.] – М.: Машиностроение, 1997. - 496 с.
6. Елисеев, Ю.С. Технология создания неразъемных соединений при производстве газотурбинных двигателей / Ю.С. Елисеев, С.Б. Масленков, В.А. Гейкин [и др.] / под общ. ред. С.Б. Масленкова. – М.: Наука и технологии, 2001. - 544 с.
7. Фролов, В.А. Специальные методы сварки и пайки / В.А. Фролов [и др.] – М.: Интермет Инжениринг, 2003. - 183 с.
8. Технология и оборудование сварки плавлением / под общ. ред. А.И. Акулова. – М.: Машиностроение, 2003. - 501 с.
9. Фролов, В.А. Технологические основы сварки в авиационной промышленности: учебник для студентов вузов / В.А. Фролов, В.В. Пешков, В.А. Селиков [и др.] под общ. ред. В.А. Фролова - 2-е изд. – М.: Интермет Инжениринг, 2004. - 576 с.
10. Сущность и техника различных способов сварки плавлением / А.И. Акулов – М.: МГИУ, 2006. - 104 с.

Учебное издание

*Демичев Сергей Федорович
Рясний Александр Валентинович
Усольцев Андрей Львович*

**ОСНОВНЫЕ СПОСОБЫ СВАРКИ
И ИХ ПРИМЕНЕНИЕ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ
УЗЛОВ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ
И ИХ ДВИГАТЕЛЕЙ**

Учебное пособие

Редактор
Компьютерная верстка
Доверстка

Подписано в печать _____ г. Формат 60x84 1/16.
Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. Печ. Л. _____. Усл. кр.-отг. _____. Печ. л. _____.
Тираж _____ экз. Заказ _____ . Арт. с.- ____2007

Самарский государственный
аэрокосмический университет.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.

Изд-во Самарского государственного
Аэрокосмического университета.
443086 Самара, Московское шоссе, 34.