

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Белорусский национальный технический университет

Кафедра «Порошковая металлургия, сварка и технология материалов»

ВВЕДЕНИЕ В ИНЖЕНЕРНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ (СВАРКА)

Учебно-методическое пособие
для обучающихся по специальности
6-05-0714-03 «Инженерно-техническое проектирование
и производство материалов и изделий из них» профилизации
«Оборудование и технология сварочного производства»

*Рекомендовано учебно-методическим объединением
высших учебных заведений Республики Беларусь по образованию
в области металлургического оборудования и технологий*

Минск
БНТУ
2025

УДК 621.791.4
ББК 27.02
В24

С о с т а в и т е л и:
*Ф. И. Пантелеенко, Т. Л. Талако,
Р. Ю. Попов, М. Н. Филиппов*

Р е ц е н з е н т ы:
заместитель директора ОХП «Институт сварки и защитных покрытий»
ГНУ «Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа»
канд. техн. наук *А. А. Радченко*;
кафедра электронной техники и технологий
УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники»
(зав. каф., канд. техн. наук, доцент *С. И. Мадвейко*)

В24 **Введение** в инженерное образование (Сварка): учебно-методическое пособие для обучающихся по специальности 6-05-0714-03 «Инженерно-техническое проектирование и производство материалов и изделий из них» профилизации «Оборудование и технология сварочного производства» / сост.: Ф. И. Пантелеенко, Т. Л. Талако, Р. Ю. Попов, М. Н. Филиппов. – Мн. : БНТУ, 2025. – 129 с.
ISBN 978-985-31-0163-8.

В учебно-методическом пособии представлены краткая информация о программе подготовки инженеров в области сварки и сварочного производства в БНТУ, базовые сведения об особенностях инженерной деятельности и рекомендации по организации самостоятельной работы студентов в техническом вузе; рассмотрена краткая история развития основных видов сварки, приведена базовая специальная терминология и характеристика основных видов сварки, а также краткий анализ тенденций развития сварочного производства в XXI веке.

Пособие предназначено для студентов высших учебных заведений, обучающихся по специальности 6-05-0714-03 «Инженерно-техническое проектирование и производство материалов и изделий из них» профилизации «Оборудование и технология сварочного производства» и может быть использовано абитуриентами, выбирающими профессию, и лицами, интересующимися сваркой и сварочными технологиями.

УДК 621.791.4
ББК 27.02

ISBN 978-985-31-0163-8

© Белорусский национальный
технический университет, 2025

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
РАЗДЕЛ 1. ВВЕДЕНИЕ В ИНЖЕНЕРНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ	6
1.1. Цели и задачи дисциплины	6
1.2. Предисловие	6
1.3. Краткая характеристика образовательной программы	7
1.4. Особенности инженерной деятельности	8
1.5. Квалификация инженера и основные инженерные навыки	9
1.6. Основы организации самостоятельной работы студентов	11
1.6.1. <i>Формы самостоятельной работы студентов</i>	11
1.6.2. <i>Рекомендации по оформлению и работе с конспектами лекций</i>	13
1.6.3. <i>Рекомендации по развитию критического мышления</i>	13
1.6.4. <i>Рекомендации по подготовке реферата</i>	14
1.6.5. <i>Рекомендации по подготовке сообщения</i>	15
1.6.6. <i>Рекомендации по подготовке презентации</i>	15
1.6.7. <i>Научно-исследовательская работа студентов</i>	17
1.7. Информационный поиск	18
1.8. Понятие и защита интеллектуальной собственности.....	21
1.8.1. <i>Понятие интеллектуальной собственности</i>	21
1.8.2. <i>Патент и порядок его получения</i>	22
1.8.3. <i>Последовательность работы при проведении</i> <i>патентных исследований</i>	24
РАЗДЕЛ 2. ВВЕДЕНИЕ В СПЕЦИАЛЬНОСТЬ «СВАРКА»	28
2.1. Краткая история развития сварки.....	28
2.1.1. <i>Первые работы в области сварки</i>	28
2.1.2. <i>Разработка электросварки</i>	30
2.1.3. <i>Разработка контактной сварки</i>	37
2.1.4. <i>Разработка газовой сварки</i>	38
2.1.5. <i>Разработка электрошлаковой сварки</i>	39
2.1.6. <i>Разработка альтернативных методов сварки</i>	41
2.1.7. <i>Разработка лучевых видов сварки</i>	45
2.1.8. <i>Сварка в ядерной энергетике</i>	49
2.1.9. <i>Сварка в космосе</i>	51
2.2. Сущность и классификация основных видов сварки	52
2.2.1. <i>Свариваемость материалов и образование сварных соединений</i>	52
2.2.2. <i>Основные металлургические процессы,</i> <i>протекающие при сварке плавлением</i>	55
2.2.3. <i>Формирование соединения при сварке давлением</i>	58

2.2.4. Классификация видов сварки	62
2.2.5. Типы соединений и положения сварки.....	64
2.2.6. Общие рекомендации по проектированию сварных конструкций	65
2.3. Характеристика основных методов сварки	66
2.3.1. Электродуговая сварка	66
2.3.2. Ручная дуговая сварка покрытыми электродами.....	69
2.3.3. Электродуговая сварка в защитных газах	71
2.3.4. Механизированная электродуговая сварка в защитном газе.....	74
2.3.5. Автоматическая электродуговая сварка под флюсом	76
2.3.6. Электрошлаковая сварка.....	78
2.3.7. Контактная сварка.....	79
2.3.8. Холодная сварка	84
2.3.9. Газовая сварка.....	86
2.3.10. Электронно-лучевая сварка.....	89
2.3.11. Лазерная сварка	91
2.3.12. Плазменная сварка.....	93
2.3.13. Сварка взрывом.....	95
2.3.14. Диффузионная сварка.....	98
2.3.15. Сварка трением	101
2.3.16. Сварка токами высокой частоты	105
2.3.17. Ультразвуковая сварка	108
2.4. Дефекты структуры и контроль качества сварных соединений	113
2.4.1. Дефекты в сварных соединениях	113
2.4.2. Методы контроля качества сварных соединений.....	114
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	118
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	119

ВВЕДЕНИЕ

Современное инженерное образование является фундаментом подготовки высококвалифицированных специалистов, способных эффективно работать в условиях стремительно развивающихся технологий и постоянно меняющихся требований промышленности. Одним из ключевых направлений инженерной подготовки является сварка – процесс соединения металлических и неметаллических материалов, который лежит в основе производства и строительства в самых разных отраслях экономики: машиностроении, энергетике, строительстве, судостроении, авиационной и автомобильной промышленности.

Сегодня сварка играет решающую роль в обеспечении прочности, надежности и долговечности конструкций, а также в оптимизации производственных процессов. Понимание основных принципов и технологий сварки необходимо каждому инженеру, так как эти знания лежат в основе проектирования, эксплуатации и модернизации оборудования и конструкций.

Цель данного учебно-методического пособия – дать студентам системное представление о профессии инженера-сварщика и сформировать базовые компетенции в области сварки. Пособие раскрывает теоретические основы сварки, описывает основные методы и технологии, рассматривает оборудование, инструменты и материалы, используемые в процессе соединения. Особое внимание уделяется вопросам безопасности, охраны труда и промышленной экологии, так как правильная организация рабочего процесса является неотъемлемой частью профессиональной подготовки.

Изучение материала пособия позволит студентам познакомиться с историей и современным состоянием сварочной отрасли; освоить основные методы и технологии сварки; понять физические процессы, происходящие при соединении материалов; научиться безопасно работать с профессиональным оборудованием; развивать инженерное мышление и навыки решения практических задач; подготовиться к более сложным дисциплинам и лабораторным практикумам по сварке и смежным инженерным направлениям.

Данное пособие предназначено для использования в учебном процессе на начальных курсах инженерных специальностей и может применяться как на лекциях, так и при проведении лабораторных и практических занятий. Оно сочетает теоретический материал с практическими примерами и упражнениями, что способствует формированию профессиональной компетенции и подготовке студентов к реальной производственной деятельности.

Таким образом, изучение сварки в рамках инженерного образования является важным этапом формирования будущего специалиста, способного эффективно проектировать, эксплуатировать и совершенствовать современные производственные системы, обеспечивая высокое качество и надежность продукции.

При написании учебно-методического пособия в качестве основных источников литературы были использованы учебники по сварочному производству, ГОСТы и учебные пособия.

РАЗДЕЛ 1. ВВЕДЕНИЕ В ИНЖЕНЕРНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ

1.1. Цели и задачи дисциплины

В настоящее время в Республике Беларусь отсутствует учебное пособие, дающее представление об учебной программе инженерной подготовки сварщиков в БНТУ.

Цель изучения дисциплины заключается в адаптации студентов первого курса к учебе в техническом вузе, формировании у обучающихся начальных представлений о своей будущей профессиональной деятельности, создании теоретической базы для успешного освоения профессиональных дисциплин и стимулировании интереса к выбранной специальности.

Задачи освоения дисциплины:

- введение в особенности инженерного образования;
- знакомство с основами организации учебного процесса и самостоятельной работы студентов в техническом вузе;
- формирование навыков самостоятельного освоения новых знаний и пользования современной технической и нормативной литературой при изучении дисциплин;
- знакомство с историей зарождения и развития сварки;
- формирование у студентов представления о сварочном производстве, основных видах сварки и процессах, протекающих при образовании сварного соединения, перспективах развития сварочного производства в XXI веке.

При написании учебно-методического пособия использованы материалы, изложенные в учебниках, учебных пособиях, методических указаниях, нормативных документах, научных статьях, материалах научно-практических конференций в области сварки, а также опыт преподавания данной дисциплины, накопленный на кафедре «Порошковая металлургия, сварка и технология материалов» БНТУ.

1.2. Предисловие

Сварочное производство – область машиностроения, обеспечивающая получение неразъемных соединений деталей узлов, механизмов и машин. Сварка относится к числу наиболее востребованных в промышленном производстве и строительстве технологий, позволяющих решать сложные технические задачи путем формирования сварных соединений, способных успешно работать в различных, в том числе экстремальных, условиях (под водой, в космосе, при высоких и криогенных температурах, в агрессивных средах, в условиях радиационного воздействия и т. д.), и отвечать требованиям экономичности, надежности и долговечности.

Ежегодный объем сварочного производства в мире составляет сотни миллионов тонн в год с устойчивой тенденцией к росту. С помощью сварки перерабатывается около 2/3 мирового и национального объемов стального проката. В Респуб-

лике Беларусь доля изделий, изготавливаемых с помощью сварки и родственных технологий, постоянно растет и составляет около 50 % валового национального продукта. Осваиваются новые технологии сварки, позволяющие внести кардинальные изменения в промышленное производство конструкций, машин, приборов и механизмов.

В этих условиях большое значение приобретает подготовка компетентных инженеров в области сварочного производства, призванных осуществлять свои профессиональные функции в условиях промышленных предприятий и других организаций Республики Беларусь.

Студенты, избравшие в качестве будущей специализации сварку, в начале обучения еще не представляют себе ее специфику, а также особенности образовательной подготовки инженерных кадров в технических вузах. Задачей этого пособия является краткое знакомство с образовательной программой подготовки по специальности 6-05-0714-03 «Инженерно-техническое проектирование и производство материалов и изделий из них» профилизации «Оборудование и технология сварочного производства» (квалификация – инженер) в БНТУ, историей развития сварки, основными понятиями и видами сварочных процессов. Пособие призвано также облегчить адаптацию первокурсников к новым для себя условиям учебной деятельности.

1.3. Краткая характеристика образовательной программы

Отношения в сфере образования в нашей стране регулируются Кодексом Республики Беларусь об образовании (Закон Республики Беларусь от 14 января 2022 г. № 154-З «Об изменении Кодекса Республики Беларусь об образовании»).

Подготовка инженеров в области сварки и сварочного производства (по профилизации 6-05-0714-03 «Оборудование и технология сварочного производства») в БНТУ осуществляется в соответствии с образовательным стандартом высшего образования ОСВО 1-36 01 06-2018 Министерства образования Республики Беларусь. Профилизация 6-05-0714-03 «Оборудование и технология сварочного производства» в соответствии с Кодексом Республики Беларусь об образовании относится к профилю образования «Техника и технологии» и обеспечивает получение профессиональной квалификации инженер.

В БНТУ осуществляется многоуровневая профессиональная подготовка инженеров: студент – магистрант – аспирант – докторант.

На первом этапе (*в течение первых 1–2 лет обучения*) студенты получают базовые естественно-научные и гуманитарные знания, необходимые для подготовки к приобретению специальных знаний и профессиональных квалификаций. В число необходимых квалификаций включается также владение иностранным языком и компьютером.

На втором этапе предусматривается получение обучающимися фундаментальных профессионально-ориентированных знаний по выбранному направлению. Обучение по профилизации 6-05-0714-03 предусматривает следующие формы: очная (дневная), заочная (сокращенная). Срок получения высшего образования в дневной и заочной сокращенной форме составляет 4 года.

Целью обучения является подготовка специалистов к решению следующих профессиональных задач:

- разработка технологических процессов сварки и планирование деятельности по проектированию, организации и управлению технологическими процессами сварки;
- организация сварочных работ на производстве, проектирование средств технологического оснащения, сборочно-сварочного оборудования;
- управление технологическими и производственными процессами, организация эксплуатации и ремонта оборудования;
- разработка методик и проведение исследований в области сварочных работ;
- обучение и повышение квалификации персонала.

Для успешного освоения специальных дисциплин требуется владеть базовыми компетенциями в области математики, физики, химии, информатики, инженерной графики, механики, электротехники и электроники, базовыми навыками использования приборной базы, цифровых и преобразовательных устройств.

Получившим базовое высшее образование выдается диплом о высшем образовании с присвоением квалификации инженер и указанием направления обучения.

Второй уровень образования включает подготовку магистров наук или дипломированных специалистов с высшим образованием, готовых к самостоятельной творческой профессиональной деятельности. Программа подготовки магистра наук предполагает преимущественно исследовательский характер его будущей деятельности. По окончании выдается диплом о высшем образовании с присвоением степени «магистр наук».

Лица, завершившие образовательно-профессиональную программу второго уровня, имеют право поступления в аспирантуру, а после ее успешного окончания и защиты диссертации – в докторантуру.

1.4. Особенности инженерной деятельности

Инженер – это специалист с высшим техническим образованием. Профессия инженера насчитывает более тысячи лет. К числу наиболее известных инженеров обычно относят Архимеда, Леонардо да Винчи, Николу Тесла, Генри Форда, Сергея Королева, Илона Маска и др.

Инженеры – не только талантливые изобретатели и конструкторы. В настоящее время профессия инженера включает разнообразные специализации: инженер-конструктор, инженер-металлург, инженер-технолог, инженер-строитель, инженер-испытатель, инженер-программист, инженер-экономист, инженер-энергетик, инженер-дизайнер, сервисный инженер и т. д. Специалисты инженерных профессий работают во всех сферах экономики. Что же объединяет такие разнообразные направления и в чем особенности инженерной деятельности?

Инженер (в простонародье «технарь») – специалист, решающий задачи в области техники. Инженеры применяют теории и принципы различных наук

для решения практических проблем в области техники. Их работа является как бы связующим звеном между научными исследованиями и их практическим применением.

Инженерная деятельность связана с работой в сфере технологий. Технология (др.-греч. τέχνη – искусство, мастерство, умение + λόγος – слово, мысль, смысл, понятие) – совокупность методов и инструментов для достижения желаемого результата. В широком смысле технология – это применение научного знания для решения практических задач. В узком смысле под технологией понимается способ решения конкретной задачи с контролируемым результатом. Технология включает в себя способы, режимы и последовательность выполнения операций.

С совершенствованием и повышением уровня сложности техники спрос на инженеров растет. В рейтинге “Jobs on the Rise” социальной сети для поиска и налаживания деловых контактов LinkedIn среди наиболее востребованных профессий, обеспечивающих быстрый карьерный рост, упоминается целый ряд инженерных специальностей.

Инженерное образование относится к числу наиболее универсальных и помогает добиться успеха во многих сферах, в том числе и бизнесе. Глава одной из крупнейших и дорогих компаний мира Amazon, Джефф Безос, – инженер по образованию (он закончил Принстонский университет в США по специальности «Электроинженерия и компьютерные технологии»).

Инженеров относят к технической интеллигенции. Однако работа инженера сопряжена с высокой ответственностью. Порой инженерные просчеты стоят очень дорого. Для успешной работы инженеру необходимо в совершенстве знать базовые дисциплины, в первую очередь, математику и физику, обладать пространственным воображением, эрудицией, глубоко изучать инженерные науки, развивать наблюдательность, инициативность и много практиковаться. Только компетентный, образованный человек, который постоянно стремится развиваться в своей сфере, может достичь успеха и стать настоящим профессионалом.

1.5. Квалификация инженера и основные инженерные навыки

В соответствии с Кодексом Республики Беларусь об образовании под специальностью понимают вид профессиональной деятельности, требующий определенных знаний, навыков и компетенций, приобретаемых путем обучения и практического опыта.

Квалификация – это знания, умения и навыки, необходимые для той или иной профессии на рынках труда, подтвержденные документом об образовании (СТБ 22.0.1-96).

Следует различать понятия компетентности и компетенции.

Компетентность – способность применять знания и навыки для достижения намеченных результатов (СТБ ISO 9000-2015).

Компетенция – знания, умения, опыт и личностные качества, необходимые для решения теоретических и практических задач.

Квалификация инженера предполагает формирование специальных и общетехнических инженерных компетенций, необходимых для реализации производ-

ственно-технологической, организационно-управленческой, научно-исследовательской и проектно-конструкторской деятельности в своей области.

Чтобы быть востребованным и конкурентоспособным инженером в будущем, важно развивать профессиональные навыки и личностные качества.

Под навыками понимают способности или знания, необходимые для выполнения конкретной задачи, приобретаемые в процессе обучения или работы.

Каковы же основные навыки инженера и как профессия инженера будет трансформироваться со временем?

Аналитики прогнозируют в будущем рост потребности в инженерах, работающих в промышленности, и увеличение востребованных направлений специализации на стыке нескольких наук. Это потребует приобретения знаний и практического опыта в различных областях.

Среди наиболее важных инженерных навыков отмечаются следующие.

Согласно прогнозам РТУ МИРЭА, в ближайшие 10 лет профессию инженера ожидает масштабная цифровизация. Поэтому к числу важнейших можно смело отнести программирование и IT-навыки, без которых невозможна работа на высокотехнологичных производствах.

Инженеры будущего должны иметь глубокие специальные знания, компетенции и профессиональные навыки в конкретных областях, связанных с выбранным направлением.

Неотъемлемой чертой успешного инженера является творческий подход (или креативность) – способность находить и реализовывать принципиально новые, нестандартные решения.

Инженер должен иметь навыки научной организации труда, быть способным к приобретению новых знаний.

К числу основных относят также так называемые soft-навыки – надпрофессиональные навыки, которые помогают решать жизненные задачи и работать с другими людьми.

Решение сложных технических задач на стыке нескольких наук невозможно без умения *работать в команде, коммуникабельности, способности решать конфликтные ситуации.*

Чтобы найти и отфильтровать из огромного объема информации необходимые, реальные и научно-доказанные данные и факты, необходимо развивать *критическое и системное мышление.* Последнее заключается в умении замечать и находить причинно-следственные взаимосвязи; оперативно разбираться в сложных механизмах, процессах, организациях.

Важным для развития личности и становления специалиста является формирование *собственной системы ценностей и ценностных ориентаций.*

Большое значение в современных условиях приобретает эмоциональный интеллект (*эмпатия*) – умение распознавать человеческие эмоции и сопереживать людям.

Все более актуальной чертой современного инженера становится *стрессоустойчивость* – умение работать и принимать ответственные решения в сложных и критических ситуациях.

Наконец, для получения актуальной научной информации из зарубежных источников, успешного обмена знаниями и опытом с зарубежными специалистами необходимо *свободно владеть иностранными языками*.

1.6. Основы организации самостоятельной работы студентов

1.6.1. Формы самостоятельной работы студентов

Важной частью освоения образовательной программы является самостоятельная работа студентов. Под самостоятельной понимается планируемая учебная, учебно-исследовательская, а также научно-исследовательская работа студентов, выполняемая по инициативе обучающегося или по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия.

Самостоятельная работа может осуществляться как во внеаудиторное время, так и на аудиторных занятиях в письменной или устной форме. Самостоятельная работа обучающихся проводится с целью:

- систематизации и закрепления полученных теоретических знаний и практических навыков;
- углубления и расширения теоретических знаний, вовлечения студентов в самостоятельную познавательную деятельность, формирования у них навыков организации такой деятельности.

В высших учебных заведениях совмещаются следующие виды самостоятельной работы: подготовка к лекциям, семинарам, лабораторным работам, зачетам, экзаменам; работа над сообщениями, рефератами, заданиями, курсовыми работами, исследовательскими проектами; и, в завершение, выполнение дипломного проекта.

В качестве дополнительной учебной самостоятельной работы полезна работа с учебниками, справочниками, дополнительной литературой; проработка конспектов лекций; прослушивание аудио- и просмотр видеозаписей по заданной теме; ведение самостоятельных конспектов рекомендуемых источников; подготовка ответов к контрольным вопросам; выполнение расчетно-графических заданий и решение задач по алгоритму.

Самостоятельная работа выполняется с использованием соответствующей методической литературы и дидактических материалов, позволяющих облегчить работу и повысить ее качество.

Самостоятельная работа предполагает максимальную активность студентов в различных аспектах организации обучения и научно-исследовательской работы. Она может осуществляться индивидуально и коллективно. Самостоятельная работа студента под руководством преподавателя протекает в форме делового взаимодействия: студент получает непосредственные указания, рекомендации преподавателя об организации самостоятельной деятельности, а преподаватель контролирует и корректирует ее. Работа в группе усиливает мотивацию и повышает эффективность познавательной деятельности студентов благодаря взаимному контролю и самопроверке. При групповой индивидуальной работе осуществляется групповая самопроверка с последующей коррекцией преподавателя.

Можно выделить четыре уровня самостоятельных работ:

1-й уровень. Выполнение заданий с использованием заданного алгоритма действий в соответствии с представленной инструкцией.

2-й уровень. Формирование знаний и навыков, позволяющих решать типовые задачи. В задании обычно сообщается идея, принцип решения и предлагается развить их применительно к данным условиям. К самостоятельным работам такого типа относятся отдельные этапы лабораторных работ и практических занятий, типовые курсовые проекты и т. д.

3-й уровень. Формирование знаний, лежащих в основе решения нетиповых задач. В самостоятельных работах такого типа требуется проанализировать незнакомую ситуацию и постараться найти, сформулировать и реализовать собственную идею решения на основании предыдущего опыта и ранее полученных знаний и навыков. Типичными примерами самостоятельной работы такого рода являются курсовые и дипломные проекты.

4-й уровень. Выполнение заданий научно-исследовательского характера, включая курсовые и дипломные проекты. Предполагает творческую деятельность, глубокое изучение объектов исследований и установление новых взаимосвязей, генерирование новой информации.

В качестве форм и методов контроля внеаудиторной самостоятельной работы могут быть использованы средства Интернет, семинарские занятия, зачеты, тестирование, контрольные работы, защита творческих работ и электронных презентаций и др.

При этом обычно оцениваются:

- уровень освоения учебного материала;
- умение использовать теоретические знания при выполнении практических задач;
- умение активно использовать электронные образовательные ресурсы, находить требующуюся информацию, изучать и применять ее на практике;
- обоснованность и четкость изложения ответа;
- оформление материала в соответствии с требованиями;
- умение ориентироваться в потоке информации, выделять главное;
- умение четко формулировать проблему, предлагать ее решение, критически оценивать возможные последствия;
- умение предлагать и анализировать альтернативные возможности и варианты действий;
- умение формировать свою позицию, оценку и аргументировать ее.

Выполнение самостоятельной работы позволяет научиться:

- 1) организовывать собственную деятельность для достижения поставленной цели;
- 2) анализировать и контролировать рабочую ситуацию, выполнять оценку и коррекцию собственной деятельности, нести ответственность за результаты своей работы;
- 3) осуществлять поиск информации, необходимой для эффективного выполнения поставленной задачи, выбирать способы ее решения, совершенствовать навыки реализации теоретических знаний;

4) работать в команде, эффективно общаться с коллегами.

Готовиться к промежуточной аттестации следует систематически, в течение всего семестра. Интенсивная подготовка должна начинаться не позднее, чем за месяц – полтора до промежуточной аттестации. Повторение и систематизацию материала эффективно начинать за три дня до зачета.

Для развития навыков самостоятельной работы необходимо ставить перед собой конкретные учебные цели и добиваться их выполнения, заниматься научно-исследовательской работой, принимать участие в вузовских предметных олимпиадах, конкурсах, научных семинарах, выступать на научно-технических конференциях, развивать свою речь. Обсуждение результатов работ развивает умение вести дискуссию, высказывать свое мнение о проблеме, отстаивать свою точку зрения.

1.6.2. Рекомендации по оформлению и работе с конспектами лекций

В конспекте лекций следует отмечать тему и дату лекции; оставлять место для замечаний; кратко, схематично, последовательно фиксировать основные положения, выводы, формулировки, обобщения; пометать важные мысли, выделять ключевые слова, термины.

Полезным является проверка изучаемых терминов и понятий с помощью энциклопедий, словарей, справочников со сравнением различных толкований и их записью в конспект или рабочую тетрадь.

Необходимо отмечать материал, который вызывает трудности. Ответы на возникшие вопросы желательно сначала искать в рекомендуемой литературе. Если самостоятельно ответить на возникшие вопросы не удастся, необходимо сформулировать вопрос и задать его преподавателю на лекции или практическом занятии.

1.6.3. Рекомендации по развитию критического мышления

Критическое мышление помогает быстро определять ключевую идею, оценивать степень достоверности и обоснованности предлагаемой информации и осуществлять выбор объективной информации, структурировать ее для формирования собственного мнения, аргументировано обосновывать свою точку зрения и на основе этого принимать оптимальное решение.

Для развития критического мышления необходимо научиться задавать самому себе вопросы для обдумывания. Ниже представлены рекомендации для развития критического мышления.

1. Следите за своим распорядком дня.

Проанализируйте, на что вы тратите свое время, что из этого приносит пользу, а что нет, какие ошибки в планировании вы допускаете и как этого можно избежать. Это поможет вам более эффективно осуществлять тайм-менеджмент.

2. Отсеивайте ненужную информацию.

Необходимо уметь отсеивать ненужное. Проверять любую мелочь долго и утомительно. Поэтому учитесь задавать себе вопрос: «Зачем мне это нужно?». Это позволит отфильтровать нужную информацию.

3. Задавайте вопросы.

Тренируйтесь задавать вопросы на разнообразные темы. Чем больше информации, тем легче понять суть. Будьте внимательны к чужим идеям. Подходите к вопросу с разных сторон, избегайте крайностей.

4. Больше читайте.

Это отличный способ тренировки критического мышления. Ищите альтернативные точки зрения. Не бойтесь испытывать дискомфорт, связанный с восприятием противоречивой информации. Чем больше знаний, тем легче составлять логические цепочки, сопоставлять факты, анализировать информацию и определять ее достоверность.

Майкл Колфилд, эксперт по цифровой грамотности в Университете штата Вашингтон в Ванкувере, рекомендует во время чтения делать небольшой фактчекинг: проверять издание, искать информацию по вопросу в альтернативных источниках, сопоставлять утверждения и цитаты с оригинальным текстом. Часто информация, вводящая в заблуждение, вырвана из контекста.

5. Играйте.

Существует множество способов потренировать свою эрудицию, логику и сообразительность в игровой форме. Участвуйте в интеллектуально-развлекательных играх, решайте кроссворды и ребусы, играйте в шахматы.

6. Учитесь новому.

Следите за новостями. Учитесь новому. Новые знания расширяют представление о мире.

1.6.4. Рекомендации по подготовке реферата

Реферат – краткое изложение в письменном виде содержания научного труда или трудов, обзор литературы по определенной теме. Изложение материала должно быть логичным и носить проблемно-тематический характер с учетом различных точек зрения, в том числе собственных взглядов на проблему. Рефераты могут быть представлены на теоретических занятиях в виде выступлений.

Типичный объем реферата составляет, как правило, 10–15 страниц формата А4.

Перед началом работы над рефератом необходимо наметить план и подобрать необходимую учебную и справочную литературу по теме реферата. В первую очередь следует пользоваться литературой, рекомендованной учебной программой, а затем расширить список источников, в том числе рассмотреть специальные журналы с новейшей научной информацией.

Типовая структура реферата включает:

- титульный лист;
- оглавление;
- введение, в котором обосновывается выбор темы, ее значимость и актуальность, указываются цель и задачи реферата;

- основная часть, которая состоит из глав и разделов, раскрывающих проблему или одну из ее сторон и логически продолжающих друг друга;
- заключение, в котором подводятся итоги и формулируются обобщенные основные выводы по теме реферата, приводятся рекомендации;
- список литературы (не менее 8–10 источников, включая источники за последние 3–5 лет).

Таблицы, графики, схемы и иллюстрации могут приводиться как в основном тексте, так и в приложениях.

При оценке реферата учитываются:

- актуальность выбора темы (при самостоятельном выборе темы студентом);
- соответствие содержания теме реферата;
- наличие цели и задач;
- наличие обобщающих выводов;
- глубина проработки материала;
- правильность выбора и полнота использования источников;
- соответствие оформления установленным требованиям;
- степень владения материалом (при публичном изложении текста реферата).

1.6.5. Рекомендации по подготовке сообщения

Сообщение представляет собой краткую информацию по сути вопроса или исследования с учетом поставленной задачи. Форма сообщения – свободная и может содержать мнение или предложения и рекомендации выступающего. Длительность выступления с сообщением, как правило, не должна превышать 5–7 минут.

Порядок подготовки сообщения:

1. Выбор темы сообщения и задачи выступления.
2. Выбор и проработка информации по материалу для сообщения.
3. Составление и запись плана сообщения.
4. Тренировка выступления с сообщением в соответствии с составленным планом и контролем затраченного времени.

После выступления докладчика обычно предусматривается время для его ответов на вопросы аудитории и для резюме преподавателя.

1.6.6. Рекомендации по подготовке презентации

Работа по подготовке презентации включает следующие этапы:

1. Сбор и изучение информации по теме.
2. Выделение ключевых понятий и определений.
3. Структурирование текста на отдельные смысловые части и блоки.
4. Подготовка доклада.
5. Разработка и оформление слайдов.

Составление презентации предполагает обдумывание не только содержания каждого слайда, но и его дизайна. Презентация должна соответствовать тексту доклада. Сначала обычно готовится доклад, затем создается презентация к нему.

Слайды содержат текстовую информацию, а также иллюстрации, схемы, фотографии, графические элементы, которые готовятся отдельно, а затем komponуются на слайдах. Слайды не должны быть перегружены графической и текстовой информацией.

Каждая отдельная информация или блок информации должны быть в отдельном предложении или на отдельном слайде. Предложения должны быть короткими, типичный максимум – 7 слов. Тезисы доклада должны быть понятными.

Важно обращать внимание на особенности визуального восприятия расположенных на слайде объектов.

Лучше использовать один стиль и одну цветовую гамму во всей презентации. Предпочтение лучше отдавать спокойным цветам фона. Не следует использовать более 3 различных цветов на одном слайде. Сочетание цветов фона и текста должно быть таким, чтобы текст было легко читать. Лучшее сочетание: белый фон, черный текст. В качестве основного шрифта рекомендуется использовать черный или темно-синий.

Размещайте наиболее важные высказывания посередине.

Текстовой информации должно быть немного, желательно использовать приемы выделения значимых терминов, понятий.

Используйте только один вид шрифта. Лучше использовать простой печатный шрифт вместо экзотических и витиеватых шрифтов. Рекомендуемые шрифты – Arial, Bookman Old Style, Calibri, Tahoma, Times New Roman, Verdana.

Используйте прописные и строчные буквы. Для выделения заголовка, ключевых слов используйте полужирный или подчеркнутый шрифт. Для оформления второстепенной информации и комментариев – курсив. Используйте общеизвестные символы и знаки.

Текст на слайдах не должен быть слишком мелким. Размер букв, цифр, знаков, их контрастность должны быть такими, чтобы их было четко видно с любого места аудитории. Для разных видов объектов рекомендуются разные размеры шрифта. Для заголовков слайдов лучше использовать размер шрифта 22–28; подзаголовков и подписей данных – 20–24; текста, подписи и заголовков осей на рисунках и диаграммах, информации в таблицах – 18–22.

Иллюстрационные материалы (рисунки, графики, таблицы) располагают так, чтобы они максимально равномерно заполняли все экранное поле. Иллюстрации должны иметь четкое, краткое и выразительное название.

Анимация не должна быть слишком активной. К использованию аудио- и видеофайлов следует относиться разумно, не «перегружать» презентацию излишней информацией и не отвлекаться от заявленной темы.

Рекомендуемое общее количество слайдов – 10–20.

Процедура представления презентации организуется в виде конференции. После демонстрации презентации желающие могут высказать свое мнение по содержанию, оформлению, защите работы. Приветствуются вопросы и рассуждения, проясняющие и уточняющие суть представленной проблемы.

1.6.7. Научно-исследовательская работа студентов

Научно-исследовательская работа является важным элементом формирования профессиональной компетентности. Она позволяет не только научиться использовать полученные знания, но и проявить свою индивидуальность и творческие способности.

Выделяют два основных вида научно-исследовательской работы студентов:

1. Учебная НИРС, предусмотренная действующими учебными планами. К этому виду можно отнести рефераты, доклады, сообщения, курсовые и дипломные работы.

2. Внеплановая совместная научно-исследовательская работа преподавателя и студента для развития исследовательских навыков и творческих способностей студентов.

Типовой порядок проведения научно-исследовательской работы включает:

- выбор проблемы;
- сбор, анализ и обобщение имеющейся информации по выбранной тематике;
- постановку задачи;
- определение способов решения поставленной задачи и планирование исследования;
- выбор исходных материалов, методов и методик проведения исследования, методов обработки информации;
- проведение исследования;
- обработку полученных данных;
- оформление теоретического и эмпирического материала;
- представление и защиту работы.

Успех научного исследования во многом зависит от качества анализа литературы и патентной информации. Важную роль при этом играет умение студента самостоятельно подбирать и анализировать научную и техническую информацию. Рекомендации по проведению информационного и патентного поиска будут представлены в п. 1.7 и 1.8.3 соответственно.

В литературном обзоре приводятся основные результаты, полученные в других работах по данной проблеме. Отмечаются вопросы, которые недостаточно изучены и представляют наибольший научный и практический интерес. Для этого пригодятся навыки критического мышления.

По итогам обобщения проанализированной информации формулируются цель и задачи исследования.

Важной частью, определяющей результативность научного исследования, является грамотная постановка задач и планирование научно-исследовательской работы. Как правило, этот процесс осуществляется студентом совместно с преподавателем или консультантом.

После завершения исследования и обработки полученных данных проводится обсуждение результатов, формулируются выводы и рекомендации и оформляется отчет.

Отчет по научно-исследовательской работе оформляется в соответствии с ГОСТ 7.32-2017 «Отчет о научно-исследовательской работе. Структура и правила оформления» и содержит следующие структурные элементы:

- титульный лист;
- список исполнителей;
- реферат;
- содержание;
- термины и определения;
- перечень сокращений и обозначений;
- введение;
- основная часть отчета;
- заключение;
- список использованных источников;
- приложения.

1.7. Информационный поиск

Сегодня студенты получают информацию из большого количества источников (библиотечных фондов, электронных средств обучения, электронных информационных ресурсов локального и удаленного доступа, других образовательных материалов) и должны уметь самостоятельно подбирать и анализировать полученную информацию.

Термин «информационный поиск» (англ. «information retrieval») предложил в 1948 г. в своей диссертации американский математик Кельвин Муэрс, которого сегодня считают основоположником научного подхода к отбору необходимой информации из массива данных. Классическая задача информационного поиска подразумевает действия, методы и процедуры, позволяющие находить документальную информацию, удовлетворяющую информационным потребностям.

С точки зрения использования компьютерной техники под «информационным поиском» подразумевается совокупность логических и технических операций, конечной целью которых является получение информации (документов, сведений о них, фактов, данных), соответствующей запросу потребителя. К информационному поиску относят также навигацию пользователя по коллекции документов, фильтрацию и дальнейшую обработку найденных документов.

Первый опыт компьютерного документального поиска провели в 1951 году в Массачусетском технологическом институте. В середине 60-х – начале 70-х годов XX века вместо механических устройств начали применять электронно-вычислительные машины, на базе которых создавались автоматизированные системы сбора, анализа, классификации, хранения, передачи на расстояние, поиска и выдачи информации. В 1990 году появилась «первая поисковая машина Арчи», которая дала возможность пользователям находить файлы по названиям в сети Интернет.

Сначала применение информационно-поисковых систем (ИПС) в университетах, библиотеках и др. ограничивалось научной информацией. С появлени-

ем сети Интернет и развитием Всемирной паутины область поиска значительно расширилась. В настоящее время русскоязычные пользователи активно используют возможности поисковых систем Яндекс и Google.

В общем случае поиск информации состоит из *четырёх этапов*:

1) определение (уточнение) информационной потребности и формулировка информационного запроса.

Для выражения информационной потребности (темы, интересующей пользователя) используется поисковый запрос, представляющий собой формализованный набор ключевых слов или словосочетаний, характеризующий потребность пользователя.

Именно поисковый запрос вводится в строку поиска ИПС. Причем объектом запроса не обязательно являются текстовые документы. В современных ИПС можно успешно искать изображения, музыкальную и другую мультимедийную информацию.

Неудачный выбор ключевых слов может привести к формированию ошибочного списка результатов запроса и просмотру ненужных документов. Поэтому поиск лучше вести по нескольким словам, их сочетаниям, а иногда и по конкретным фразам. Все служебные слова (предлоги, союзы, частицы и т. п.) не являются ключевыми. В запрос также не следует включать редкие термины. Часто встречающиеся слова и выражения необходимо приводить в сочетании с другими словами, сужающими область поиска и уточняющими их значение;

2) определение совокупности возможных держателей информационных массивов и выбор источников, соответствующих запросу пользователя.

На этом этапе определяют, какой тип информационных источников будет соответствовать информационной потребности в конкретной ситуации: источник на традиционных носителях или информация в режиме онлайн, подписные базы данных и др;

3) извлечение информации из выявленных информационных массивов.

Для извлечения информации из массивов данных выбирают модель поиска.

Первой начала использоваться булева модель информационного поиска, в которой запрос пользователя представляет собой логическое выражение, содержащее ключевые слова, связанные операторами AND (и), OR (или), NOT (нет). Скобки тоже являются оператором и позволяют объединить два термина в один. Современные булевы модели информационного поиска включают также операторы близости элементов запроса. Пользователь указывает, на каком расстоянии между собой должны располагаться ключевые слова в документе. При этом под расстоянием понимается либо количество слов между двумя выделенными словами, либо задается указание структурной единицы документа (предложение, абзац), в которой должны упоминаться элементы запроса.

Булева логика определяет связь: термин – документ, т. е. она позволяет определить лишь наличие или отсутствие термина в документе. Основным достоинством такой модели является простота, способность работать с большими объемами информации и высокая скорость выполнения поисковых запросов.

В то же время употребление оператора OR может привести к слишком широкому запросу. В таком случае придется последовательно добавлять дополнительные условия или ограничения, чтобы уменьшить результирующую выборку. При употреблении логического оператора AND может быть получен отрицательный результат, если факты несовместимы или в электронном ресурсе отсутствуют элементы, содержащие оба поисковых признака одновременно. Также часто возникает ситуация, когда условия булева запроса оказываются противоречивы, и пользователь не получает ни одного документа. С осторожностью необходимо использовать и оператор NOT, который рекомендуется употреблять лишь в случае полного отрицания понятий. Существенным недостатком классической булевой модели является и то, что она не позволяет сортировать документы по степени их соответствия запросу.

Как правило, полезную выборку обозримого размера можно получить, задав сложную логическую формулу. При этом требуется не только знание правил построения формул, но и владение «языком» предметной области.

Ниже представлено несколько рекомендаций и примеров, отражающих особенности использования булевой модели:

- 1) операторы вводятся прописными буквами;
- 2) поисковые запросы рассматриваются в следующем порядке: $() \rightarrow NOT \rightarrow AND \rightarrow OR$, независимо от их порядка в строке поиска.

С учетом того, что в строке поиска в первую очередь рассматривается условие в скобках, результат обработки запросов будет разным в зависимости от их расположения, например:

– *(сварка OR наплавка) NOT ручная* – сначала ИПС найдет документы, в которых есть слова «сварка» или «наплавка», а затем исключит из выборки те, которые содержат слово «ручная»;

– *сварка OR (наплавка NOT ручная)* – сначала ИПС найдет документы, в которых есть слово «наплавка» и нет слова «ручная», а затем добавит документы со словом «сварка».

Сложный запрос, например, *(NOT notebook: оборудование AND tag: пайка AND tag: ручная) OR (NOT tag: ручная AND tag: сварка AND tag: плавлением)*, будет обработан следующим образом: сначала ИПС исключит из результатов заметки из блокнота «оборудование» и те, у которых есть метки «пайка» и «ручная». Затем добавит заметки, у которых нет метки «ручная», зато есть метки «сварка» и «плавлением».

Современные ИПС чаще используют различные варианты векторной модели, в которой в основном применяются свободные текстовые запросы (набирают одно или несколько слов без строгих языковых конструкций с операторами). Система сама определяет, какие документы лучше удовлетворяют этим запросам. Однако при работе с большими коллекциями итоговое количество документов, соответствующих запросу, может быть настолько большим, что человек просто не в состоянии все просмотреть.

- 4) *ознакомление с полученной информацией и оценка результатов поиска.*

Согласно ГОСТ 7.73-96, эффективность поиска оценивается двумя основными понятиями: релевантность и пертинентность. Релевантными (англ. relevant – существенный, относящийся к делу, уместный) называются документы, содержание которых соответствует информационному запросу, а пертинентными (англ. pertinent, фр. pertinent – надлежащий, подходящий, лат. pertinēre – быть важным) – содержание которых соответствует информационной потребности.

В автоматизированных системах поиск основан на формальной релевантности. Если поисковый запрос сформулирован точно и достаточно подробно, то релевантный ответ должен быть и пертинентным. Идеальная ИПС должна выдавать исключительно документы, содержательно релевантные запросу. Однако на практике этого, как правило, не наблюдается. Часто встречается так называемое «молчание» ИПС (невыдача некоторого количества релевантных документов) и «шум» (выдача лишних документов). Следует отметить, что релевантность (степень соответствия запроса) относится к субъективным понятиям и зависит от конкретного человека, оценивающего результаты поиска.

Качество поиска в ИПС обычно характеризуется полнотой и точностью. Полнота поиска определяется общим количеством найденных документов, а точность – соотношением между найденными релевантными и нерелевантными документами.

При поиске научной информации при увеличении полноты, как правило, снижается точность и наоборот. Из-за ошибок и неточностей, возникающих на каждом из этапов работы, как пользователя, так и системы, результаты могут сильно отличаться от информационной потребности.

1.8. Понятие и защита интеллектуальной собственности

1.8.1. Понятие интеллектуальной собственности

Возникновение термина «интеллектуальная собственность» относят к концу XVIII века и связывают с работами французских философов-просветителей (Дидро, Вольтер, Гельвеций, Гольбах, Руссо), считавших, что создатель результатов творческого труда имеет исключительное право распоряжаться ими. Однако широкое употребление этого термина началось лишь во второй половине XX века после подписания в 1967 году в Стокгольме Конвенции, учреждающей Всемирную организацию интеллектуальной собственности (ВОИС).

В широком понимании термин «интеллектуальная собственность» означает закрепленное законом временное исключительное право, а также личные неимущественные права авторов на результат интеллектуальной деятельности или средства индивидуализации.

Законодательство, определяющее права на интеллектуальную собственность, устанавливает монополию авторов на определенные формы использования результатов их интеллектуальной, творческой деятельности, которые могут использоваться другими лицами лишь с разрешения первых.

Авторское право в Республике Беларусь регулируется Законом «Об авторском праве и смежных правах». В республике действует система защиты интел-

лектуальной собственности, предполагающая инициативу правообладателя. Это означает, что государственные органы осуществляют самостоятельные действия лишь в исключительных случаях, когда вопросы связаны с угрозой жизни или здоровью граждан. Во всех остальных случаях защита прав интеллектуальной собственности в Беларуси должна инициироваться правообладателем.

Защита объектов интеллектуальной собственности начинается с приобретения прав на них. Способы правовой защиты объектов интеллектуальной собственности зависят от их видов. Сегодня в Беларуси чаще всего защищают авторские права, товарные знаки, патенты и программное обеспечение.

В инженерной деятельности особенно востребована патентная защита изобретений. В соответствии с законодательством Республики Беларусь исключительное право на изобретение охраняется государством и подтверждается патентом.

1.8.2. Патент и порядок его получения

Слово «патент» происходит от латинского *Litterae Patentes*, что в переводе означает «открытая грамота». Считается, что первый патент был выдан в 1421 г. городской управой Флоренции Филиппо Брунеллески, который изобрел корабельный поворотный кран. А первый законодательный акт (указ, предписывавший сообщать властям о реализованных на практике изобретениях для предотвращения их использования третьими лицами) был издан в Венецианской республике в 1474 г.

В России юридическая форма патента до Октябрьской революции 1917 года называлась привилегией. Считается, что первая привилегия на изобретение была выдана 2 марта 1748 г. купцам Тавлееву, Волоскову и Дедову на «устройство фабрик для делания красок и о правилах учреждения оных».

Закон Республики Беларусь «О патентах на изобретения, полезные модели, промышленные образцы» определяет изобретение как решение технической задачи, относящееся к материальному объекту – продукту, или процессу осуществления действий над материальным объектом с помощью материальных средств – способу. Объем правовой охраны, предоставляемой патентом на изобретение, определяется формулой изобретения. Исключительное право на изобретение означает право патентовладельца самому использовать свое изобретение, предоставлять по своему усмотрению право использовать его другим лицам, а также запрещать использование изобретения другими лицами.

Необходимо различать авторов изобретения и патентообладателей. Автором изобретения признается физическое лицо, творческим трудом которого оно создано. Имя автора указывается в заявке. Если изобретение создано совместным творческим трудом двух и более физических лиц, они считаются соавторами. Порядок пользования правами, принадлежащими соавторам, определяется соглашением между ними. Лица, не внесшие личного творческого вклада в создание изобретения, а оказавшие автору (соавторам) только техническую, организационную или материальную помощь либо способствовавшие оформлению прав на использование изобретения, соавторами не признаются.

Патентообладатель (патентообладатели) – это лицо (лица), которому (которым) выдан патент на изобретение. Право на получение патента может принадлежать автору (соавторам) изобретения; физическому или юридическому лицу, являющемуся нанимателем автора изобретения (в случаях, предусмотренных Законом); физическому и (или) юридическому лицу или нескольким физическим и (или) юридическим лицам, которым право на получение патента передано автором либо нанимателем автора до даты регистрации изобретения; правопреемнику (правопреемникам) указанных выше лиц.

Изобретение считается служебным, если оно имеет отношение к области деятельности нанимателя при условии, что деятельность, которая привела к его созданию, относится к служебным обязанностям работника, либо они созданы в связи с выполнением работником конкретного задания, полученного от нанимателя, либо при их создании работником были использованы опыт или средства нанимателя. Если в договоре между нанимателем и работником не оговорено иное, то право на получение патента на служебное изобретение, созданное работником, принадлежит нанимателю.

В качестве критериев (условий) охраноспособности изобретения приняты следующие:

1) отнесение изобретения к продукту или способу. Под продуктом понимается предмет как результат человеческого труда, а под способом – процесс, прием или метод выполнения взаимосвязанных действий над объектом (объектами), а также применение процесса, приема, метода или продукта по определенному назначению;

2) новизна (изобретение является новым, если оно не является частью уровня техники (уровень техники включает любые сведения, ставшие общедоступными в мире до даты приоритета изобретения));

3) изобретательский уровень (изобретение имеет изобретательский уровень, если оно для специалиста явным образом не следует из уровня техники);

4) промышленная применимость (изобретение является промышленно применимым, если оно может быть использовано в промышленности, сельском хозяйстве, здравоохранении и других сферах деятельности);

5) регистрация изобретения в Государственном реестре изобретений с выдачей патента на изобретение.

В соответствии с Положением «О порядке составления заявки на выдачу патента на изобретение, проведения по ней экспертизы и вынесения решения по результатам экспертизы» процедура получения патента на изобретение включает следующие этапы:

1. Составление заявки на регистрацию патента.
2. Уплата патентной пошлины за подачу заявки и проведение экспертизы этой заявки.
3. Подача заявки и иных необходимых документов в патентный орган.
4. Экспертиза заявки.
5. Принятие решения о регистрации изобретения либо об отказе в регистрации.

6. Регистрация изобретения в Государственном реестре изобретений и выдача патента на изобретение. Обжалование решения об отказе в регистрации изобретения.

Заявка на регистрацию изобретения должна содержать:

- 1) заявление о выдаче патента с указанием автора (соавторов) изобретения и лица (лиц), на имя которого (которых) испрашивается патент, а также их места жительства или места нахождения;
- 2) описание изобретения, раскрывающее его с полнотой, достаточной для осуществления изобретения;
- 3) формулу изобретения, выражающую его сущность и полностью основанную на описании;
- 4) чертежи, если они необходимы для понимания сущности изобретения;
- 5) реферат.

Для корректного составления заявки на изобретение предварительно проводятся патентные исследования.

1.8.3. Последовательность работы при проведении патентных исследований

Патентные исследования (ПИ) – это исследования, проводимые в основном на базе патентной информации, зафиксированной в патентных документах с привлечением (при необходимости) некоторых других видов информации, направленные на определение технического уровня, тенденций и направлений развития объектов техники, их патентоспособности, конкурентоспособности и патентной чистоты.

Основным руководящим документом при проведении патентно-информационных исследований является Государственный стандарт Республики Беларусь СТБ 1180-99 «Патентные исследования. Содержание и порядок проведения».

Последовательность работ при проведении патентно-информационных исследований включает следующие этапы:

- 1) разработка задания на проведение патентных исследований;
- 2) разработка регламента поиска;
- 3) поиск и отбор патентной и научной информации;
- 4) систематизация и анализ отобранного информационного массива;
- 5) обобщение результатов и составление отчета о патентных исследованиях.

При проведении патентных исследований для определения технического уровня и тенденций развития в выбранной области поиск проводят на глубину, достаточную для установления тенденций развития того вида техники, к которой относится разрабатываемый объект (рекомендуется от 10 до 15 лет), с расстановкой информации в хронологическом порядке. Регламент ограничивает область проведения поиска по фондам патентной, научно-технической и конъюнктурно-экономической информации. К последней относят сведения о конъюнктуре рынка, процессах производства, материальных ресурсах, процессах управления производством, финансовых процессах, а также сведения экономического характера, которыми обмениваются между собой различные системы управления.

Предметом поиска могут являться материалы, машины, приборы, оборудование, инструменты, научно-техническая продукция, технологические процессы и т. д.

Предмет поиска формулируется с использованием терминологии, принятой в системе Международной патентной классификации (МПК). Для определения предмета поиска вначале определяют ключевые слова по теме. При недостатке информации проводится поиск по выпускам Реферативных журналов (РЖ) соответствующего профиля, издаваемых Всероссийским институтом научной и технической информации Российской академии наук (ВИНИТИ РАН).

Как правило, при определении технического уровня, тенденций развития и ведущих организаций (фирм) для поиска выбирают страны, в которых хорошо развита данная область техники, а также пять высокоразвитых стран дальнего зарубежья (США, Япония, Франция, Германия, Великобритания).

Для правильного проведения поиска информации необходимо определить классификационные рубрики по каждому предмету поиска (в одной теме может быть выделено несколько предметов поиска). Для классификации изобретений используют международную и национальные патентные классификации изобретений (МПК и НКИ). Поиск патентной информации об изобретениях и полезных моделях производится в соответствии с установленными индексами МПК и НКИ. Для конкретизации области определяют раздел, класс, подкласс, группу, подгруппу.

Примерный перечень классификационных индексов МПК выявляется по результатам предварительного поиска информации по РЖ и ресурсам ВИНИТИ соответствующего профиля. Перечень всех классификационных рубрик определяется с помощью Алфавитного предметного указателя (АПУ) и непосредственно по Указателям классов изобретений (УКИ). По ключевым словам, войдя в базу данных Национального центра интеллектуальной собственности (<https://ncip.by/>), также можно определить рубрики МПК по заданной теме.

Для поиска научно-технической и конъюнктурно-экономической информации используют универсальную десятичную классификацию (УДК).

Перечень всех классификационных рубрик определяется для каждого объекта (предмета) поиска непосредственно по указателям классов (классификаторам). Если не удастся выявить классификационные рубрики непосредственно по указателям классов, целесообразно классификацию предметов поиска начать с алфавитно-предметных указателей, используя термины, ключевые слова, словосочетания, характеризующие предметы поиска. Это позволяет выявить страны, в которых специалисты занимаются решением аналогичных проблем, а также определить основные рубрики МПК, необходимые для составления регламента поиска.

В зависимости от страны поиска существуют следующие источники патентной информации:

- в Республике Беларусь – бюллетень Национального центра интеллектуальной собственности (НЦИС) «Афіцыйны бюлетэнь»;
- в России – бюллетень патентного ведомства Российской Федерации «Изобретения, полезные модели»;

– в странах дальнего зарубежья (США, Франция, Германия, Великобритания, Япония) – патентные бюллетени на языке соответствующей страны (имеются в Республиканской научно-технической библиотеке – РНТБ, г. Минск, пр. Победителей, 7) или реферативные журналы на русском языке «Изобретения стран мира» (там же);

– источники научно-технической информации – книги по интересующей области техники, монографии, сборники трудов, периодические издания, отчеты о НИР и ОКР, диссертации, РЖ/ВИНИТИ по профилю и т. д.

К источникам конъюнктурно-экономической информации относятся национальные и международные статистические издания, общеэкономические, специальные и отраслевые периодические издания, экономические, отраслевые и фирменные справочники и т. д., например, журнал «Бюллетень иностранной коммерческой информации» (БИКИ).

Для ускорения патентного поиска используют электронные базы данных (информацию в Интернете).

Вы можете воспользоваться бесплатными базами данных патентных документов в Интернете:

– Для поиска патентной информации по Республике Беларусь необходимо использовать электронный адрес: <https://ncip.by>.

– Для поиска в базе данных Российской Федерации используется электронный адрес: <https://fips.ru>. Более полную информацию об условиях доступа в информационно-поисковую систему интернет-портала *fips* (ФИПС) можно найти на главной странице сайта.

– Поиск евразийских патентов осуществляется в Интернете с использованием Евразийской патентно-информационной системы (ЕАПАТИС) по адресу: <https://www.eapo.org>.

– Поиск патентов по странам дальнего зарубежья (США, Германии, Японии, Великобритании, Франции) можно осуществлять с использованием европейской базы патентов Espacenet на языке оригинала по адресу: <https://www.epo.org>, либо мировой базы патентов WIPO по адресу: <https://patentscope.wipo.int>.

– Российский сегмент Интернет-сервиса Espacenet, имеющий русифицированный интерфейс, располагается на сервере Роспатента, доступен по адресу: <https://www1.fips.ru/>, и в настоящий момент включает источники патентной информации из более 90 патентных ведомств, доступные для широкого круга пользователей.

– Для поиска патентной информации на русском языке по странам дальнего зарубежья (Великобритании, Германии, Франции, США, Швейцарии, Японии, Европейской патентной организации – ЕПС, Всемирной организации интеллектуальной собственности – ВОИС и др.) можно пользоваться базой данных «Изобретения стран мира», доступ к которой открыт для пользователей Республиканской научно-технической библиотеки в читальном зале отдела патентных документов.

После проведения поиска информации по составленному запросу приступают к анализу имеющейся информации и составляют итоговый отчет, который содержит:

- 1) выявленные тенденции развития объекта техники;
- 2) наименования ведущих организаций (фирм), имеющих внедренные разработки в исследуемой области либо активно ведущих разработки в этой области и имеющих соответствующие патенты;
- 3) перечень лучших промышленно освоенных объектов техники с указанием их наименования, условного обозначения (модель, серия) и года промышленного освоения. Если информация об освоенных объектах техники отсутствует, отмечают данные об опубликованных источниках информации и источники информации либо номера патентов, подтверждающих выявленные тенденции;
- 4) описание научно-технической сущности лучших найденных объектов и полученные при этом результаты.

В выводах необходимо отметить следующие моменты:

1. Анализ новизны и значимости рассматриваемой проблемы в сравнении с достижениями мировой науки и техники (оценка уровня разработки).
2. Предполагаемая новизна исследований.
3. Перспективность исследования.
4. Ожидаемые результаты.
5. Возможные области применения.

РАЗДЕЛ 2. ВВЕДЕНИЕ В СПЕЦИАЛЬНОСТЬ «СВАРКА»

2.1. Краткая история развития сварки

2.1.1. Первые работы в области сварки

Сварка известна с древних времен. Еще в VIII–VII веке до н. э., когда люди начали добывать первые металлы, пытаясь изменить их форму для создания орудий труда, они научились соединять отдельные кусочки.

Сначала было освоено соединение пластичных металлов, для изменения формы которых было достаточно использования камней и физической силы. Нанося удары по сложенным вместе кускам самородков из золота, серебра или меди, удавалось добиться их соединения. Сегодня мы относим подобные процессы к разновидности холодной сварки.

Появление бронзы, имеющей меньшую пластичность по сравнению с медью, привело к разработке новых способов соединения с использованием подогрева металлов. Считается, что бронзовые сосуды высотой 310 мм с толщиной стенок всего 0,5–0,7 мм в Древней Греции получали так называемой литейной сваркой, сущность которой заключалась в том, что зазор между соединяемыми заготовками заполняли расплавленным металлом, а деформирование сварного соединения происходило в твердотвердом состоянии.

С началом активной добычи железа стала применяться обработка, во время которой производился подогрев отдельных компонентов до пластичного состояния, после чего ударами ручного ударного инструмента (молота или кувалды) формировали прочное соединение (кузнечная сварка). Использование кузнечной сварки позволило изготавливать крупные изделия из меди и железа.

На рисунке 2.1 представлен знаменитый памятник в Индии – колонна, изготовленная из удивительно чистого для времени ее создания железа (99,97 % Fe). Колонна имеет высоту 7,3 м и весит около 6,5 тонн с диаметром при основании 416 мм. Годом ее создания считают 415 г. н. э. С учетом того, что до начала XIX века не было известно способов получения температур, достаточных для расплавления железа (порядка 1550 °C), одной из гипотез, объясняющей создание этой колонны, является кузнечная сварка кусочков технически чистого железа в нагретом состоянии. Сначала в горнах при температурах порядка 1000 °C восстановлением железной руды древесным углем получали так называемую крицу, имеющую вид губчатой массы и состоящую из зерен чистого железа и шлака. А затем крицу неоднократно проковывали в нагретом состоянии. При этом отдельные включения шлака и угля выдавливались, а частицы железа сваривались, образуя плотный и более чистый металл. Такое железо называли также «сварочным», а указанные приемы применяли как при ремонте разрушенных изделий из железа, так и для соединения отдельных кусков при изготовлении орудий труда и оружия.

Вершиной кузнечной сварки считаются многослойные тонкие клинки ножей и мечей с дифференцированными свойствами, которые изготавливали опытные кузнецы-сварщики в различных странах. Так, мечи I–II вв., найденные на местах бывших римских крепостей и поднятые с затонувших кораблей, были

неоднородны по толщине и представляли собой чередующиеся в определенной последовательности слои твердой стали и мягкого железа. Такие мечи обладали высокой прочностью и способностью самозатачиваться.



Рис. 2.1. Колонна из кричного железа в Индии

В XIX веке н. э. кузнечная сварка достигла пика своего развития, была механизирована и успешно применялась для производства железнодорожного транспорта и рельсов, паровозов, паровых котлов, паровых машин и т. п. Однако она была трудоемка, малопродуктивна, требовала создания громоздких печей и молотов. Кроме того, качество сварных швов было нестабильным, что приводило к разрушению нагруженных деталей во время работы. Это происходило из-за того, что основными технологическими параметрами процесса сварки являлись температура свариваемого металла и величина его деформации в зоне сварки, которые трудно было выдерживать в требуемом достаточно узком диапазоне.

Резкие перемены в технологии сварки изделий в конце XIX в. связаны с важными открытиями в области физики, химии, механики и электротехники, позволившими локально расплавлять свариваемые поверхности и формировать прочное соединение путем образования общей сварочной ванны с последующей кристаллизацией за счет использования мощных электрических источников нагрева и теплоты сгорания горючих газов – сварки плавлением.

2.1.2. Разработка электросварки

В 1802 году профессор физики Петербургской медико-хирургической академии Василий Владимирович Петров открыл явление электрического дугового разряда и установил возможность использования электрической дуги в практических целях (для расплавления металлов). Это открытие, ставшее впоследствии прототипом многочисленных сварочных устройств, он изложил в своей книге «Известия о гальвани-вольтовых опытах», которая была опубликована в 1803 году. Однако широкого внимания в то время книга не привлекла.

Лишь в 1881 году русский изобретатель Николай Николаевич Бенардос (рис. 2.2) начал применять электрическую дугу при соединении металлов с использованием угольного электрода и присадочной проволоки. Он продемонстрировал новый способ соединения металлов в Париже, в экспериментальной лаборатории при журнале «Электрисьен». Способ электродуговой сварки неплавящимся электродом получил название «способа Бенардоса».

Первая мастерская по сварочным работам была создана Бенардосом в 1885 году в товариществе «Электрогефест». В течение 1885–1887 гг. способ электродуговой сварки, получивший название «электрогефест», оборудование для ее осуществления и некоторые типы сварных соединений были запатентованы во всех промышленно развитых странах.

В России дуговую электросварку впервые применили на Куваевской мануфактуре и заводе Пономарева в Иваново-Вознесенске. А в 1888-м с помощью запатентованного метода «электрогефест» начали ремонтировать детали паровозов и вагонов в Рославльских железнодорожных мастерских Орловско-Витебской железной дороги. К середине 1890-х способ дуговой сварки был внедрен уже на десятках промышленных предприятий России, эту технологию использовали более чем на 100 заводах Западной Европы и в США не только для ремонта, но и для производства новых металлических изделий.

К 1892 году Н. Н. Бенардос разработал электрическую сварку не только с угольным, но и с металлическими электродами. Ему принадлежат также идея и разработка устройства для сварки металлическим электродом на переменном токе, идея защиты зоны сварки от контакта с воздухом струей газа, разработка сварки наклонным электродом.

Значительный вклад в развитие дуговой электросварки внес Николай Гаврилович Славянов (рис. 2.3), предложивший существенные усовершенствования, касающиеся, в первую очередь, металлургии сварки.



Рис. 2.2. Николай Николаевич Бенардос (1842–1905)



Рис. 2.3. Николай Гаврилович
Славянов (1854–1897)

Освоив в Горном институте металлургию и электротехнику, Славянов в 1883 г. был назначен управляющим орудийных и механических фабрик Пермских пушечных заводов в Мотовилихе. На этих заводах с 70-х гг. XIX века начали выплавлять сталь в мартеновских печах. Однако, несмотря на соблюдение всех требований к шихте и режимам выплавки, сталь иногда содержала больше вредных примесей по сравнению с уральской сталью, получаемой на древесном угле. Сварка таких сталей способом Бенардоса не всегда была удачной из-за попадания в шов оксидных включений, наличия в нем значительного количества серы и фосфора.

Н. Г. Славянов заменил угольный электрод металлическим, близким по химическому составу со свариваемым изделием. Тем самым было положено начало дуговой сварке плавящимся электродом. Поначалу в качестве электродов использовали прутки из холоднокатанной стали (телеграфной проволоки, проволоки для изгороди и т. д.). Дугу от таких электродов было трудно зажигать и поддерживать, так как она горела на открытом воздухе, и поэтому металл сварного шва был загрязнен кислородом и азотом, имел неровную поверхность и содержал большое количество пор и пустот. Процесс сварки сопровождался заметным крупнокапельным переносом металла.

Владея металлургическими знаниями, Славянов предложил для повышения качества сварного шва использовать металлургический флюс, образующий слой шлака над расплавленным металлом сварочной ванны. Это позволило выполнять сварку и наплавку ответственных деталей.

18 октября 1888 г. на Мотовилихинском заводе в Перми Славянов продемонстрировал свой способ сварки группе металлургов и электротехников из Петербурга, в 1891 г. получил русскую Привилегию № 8748 на способ и аппараты для электрической отливки металлов и запатентовал свое изобретение во Франции, Германии, Великобритании, Австро-Венгрии и Бельгии, а в 1897 г. получил патент США.

Когда Славянов узнал, что в некоторых западных газетах заявляют о невозможности применения его способа для сварки цветных металлов, он изготовил пятикилограммовый двенадцатигранный многослойный стакан высотой 210 мм, который содержал все известные виды металлов и сплавов того времени (рис. 2.4). Для этого он наварил на сталь один за другим электроды из бронзы, никеля, стали, чугуна, меди, особой колокольной бронзы, томпака и нейзильбера. На Всемирной выставке в Чикаго в 1893 г. за эту разработку Славянов получил Почетный диплом и золотую медаль, а изготовленный стакан хранится в Доме-музее Николая Славянова в Перми.



Рис. 2.4. Стакан Славянова

Славянова интересовали и вопросы механизации и автоматизации дуговой электросварки. Он изготовил и опробовал первый в мире сварочный полуавтомат («электроплавильник»), элементы которого используются в современных автоматических сварочных головках.

К числу важных для развития электродуговой сварки относят также изобретение шведом Оскаром Кьельбергом сварочного электрода с покрытием.

Первые попытки нанести флюсы непосредственно на поверхность электродов оказались неэффективными. Это связано с тем, что первоначально пытались использовать флюсы, близкие по составу к флюсам кузнечной сварки (песок, борат, пепел и т. п.), а процессы дуговой и кузнечной сварки существенно отличаются. В 1904 году Кьельберг основал фирму «ESAB», занимавшуюся сваркой в судостроении.

Следует отметить, что вплоть до 60-х годов XIX века преобладающим способом соединения металлических листов в кораблестроении была клепка. В 1905 году Кьельберг установил, что нанесение на металлические электроды пасты на основе извести и силиката натрия позволяет не только стабилизировать горение электрической дуги, но и защитить зону сварки и повысить качество сварного шва. В 1906 году Кьельберг получил патент «Процесс электрической сварки и электроды для этих целей».

Это положило начало широкому использованию сварки для ремонта судов.

Сначала технология сварки была опробована для ремонта судов, поврежденных во время русско-японской войны. К 1912 году для ремонта бойлеров морских судов были разработаны электроды с толстым покрытием, позволившие не только обеспечить прочность сварных соединений на уровне свариваемых металлов, но и снизить зависимость качества сварки от квалификации сварщика.

Успех этих работ привел к идее использования сварки с самого начала сооружения судна. После ремонта небольших барж в 1915–1917 гг. и выдачи Регистром Ллойда в 1918 году первых нормативов на сварку судов, были разрешены проектирование и спуск на воду судов с цельносварным корпусом.

Вскоре после Первой мировой войны все государства, имеющие в своем распоряжении морской флот, стали использовать сварку при строительстве судов. А с началом Второй мировой войны началось массовое производство сварных судов. Только в США было построено 2 600 так называемых «Либерти Шипс» (Кораблей Свободы).

Ряд проблем, связанных с хрупким разрушением сварных корпусов судов из-за остаточных напряжений и отсутствия способности к деформации при определенных условиях, был решен с помощью разработки специальных материалов и требований к проектированию и сварке.

С тех пор дуговая сварка покрытыми электродами начала применяться в промышленности, обеспечивая высокую надежность сварных швов, а составы и технологии получения электродов непрерывно совершенствуются.

С ростом объемов сварочных процессов, используемых на производстве, возникла необходимость их автоматизации. Кроме экономических стимулов, важным фактором являлось нестабильное качество сварных соединений, получаемых вручную.

Считается, что первую простейшую автоматизацию сварочных процессов организовала фирма Кьельберга, которая запустила аппарат для ручной дуговой сварки, в обойму которого «заряжалось» несколько десятков штучных электродов с толстым покрытием. Как только сгорал один, подавался следующий. Главным недостатком таких автоматов являлись перерывы в процессе сварки, связанные с переносом дуги со сгоревшего электрода на новый. Много времени занимала и перезарядка обоймы.

В 1919 г. на фирме «Дженерал электрик» в США была изготовлена первая автоматическая дуговая сварочная головка, использующая катушку с электродной проволокой, в которой подача проволоки и подведение к ней электрического тока осуществлялось с помощью роликов с электродвигателем.



Рис. 2.5. Дмитрий Антонович Дульчевский (1879–1961)

В СССР один из первых отечественных автоматических аппаратов для дуговой сварки с автоматической подачей электрода появился в 1924 г., а разработал его мастер Одесских железнодорожных мастерских Дмитрий Антонович Дульчевский (рис. 2.5). А в 1925 году Дульчевскому удалось осуществить и автоматическое возбуждение дуги. Это позволило повысить производительность дуговой сварки и наплавки в несколько раз.

В 1929 г. на кафедре инженерных сооружений при Академии наук УССР Е. О. Патон (1870–1953) создал электросварочную лабораторию, в которой в 1931–1932 гг. сконструировали модель автоматической сварочной головки с открытой дугой, а к 1935 г. были выпущены 102 автоматические головки для сварки плавящимся электродом с 5-угольной дугой.

С конца 20-х и в течение 30-х гг. XX века во многих странах, в том числе и в СССР, были созданы и испытаны многочисленные конструкции для непрерывной сварки, в том числе с использованием проволоки с покрытием.

В 1924 году в структуре Наркоммаша для внедрения новых методов обработки, улучшения и усовершенствования станков и приспособлений был создан Гос-

ударственный трест по рационализации производства в машиностроительной и металлообрабатывающей промышленности (АО «Орга-металл»), а в 1928 г. при нем образовалась сварочная контора, преобразованная в 1936–1937 гг. в Сварочный комбинат, занимавшийся разработкой покрытий электродов, проблемами автоматизации сварки, сваркой чугуна и легированной стали. В 1938 году АО «Орга-металл» был объединен с ЦНИИТМАШ и стал отделом сварки ЦНИИТМАШ.

В апреле 1929 г. при Высшем совете народного хозяйства (ВСНХ) СССР был создан Всесоюзный автогенный комитет. В 1931 г. на основе Автогенного комитета и Акционерного общества «Рагаз» создали Всесоюзный автогенный трест (ВАТ). В ноябре 1936 г. было образовано Всесоюзное научно-техническое общество сварщиков (ВНИТОС), основной задачей которого стало содействие развитию сварочной техники и сварочного производства в СССР. Постановлением Совета труда и обороны от 28 сентября 1934 г. «О развитии электросварки и автогенного дела» предусматривалось широкое применение сварных конструкций вместо литых, увеличение объемов производства электродов и машин для сварки. Если в начале первой пятилетки в СССР было 1 200 сварочных установок, то в конце 1932 г. – 14 тысяч, в 1930–1939 – 15 тысяч, в 1940 – 2,5 млн.

К 1931 г. завод «Электрик» стал крупнейшим в СССР заводом электросварочного оборудования, где начали выпускать сварочные генераторы типа СМТ, в 1932 г. – сварочные трансформаторы и агрегаты САК-2-1. К 1939 г. на заводе «Электрик» было произведено 67 тысяч различных источников питания и около 8 000 контактных машин и аппаратов. Разрабатывались новые марки электродов и электродных покрытий. Динамика роста централизованного производства электродов в те годы была следующая: 19 тысяч тонн в 1931 г., 32 тысячи – в 1932 г., 43 тысячи – в 1937 г.

Сварка применялась в строительных металлоконструкциях и других отраслях. Постепенно количество узлов, которые производили с использованием сварки, росло, и в 30-е годы XX века были спроектированы полностью сварные конструкции железнодорожных составов, локомотивов, трамваев, электрогенераторов и даже бронемашин.

В 1930 г. Харьковский паровозоремонтный завод выпустил первый сварной локомотивный котел. В 1931 г. Киевский завод «Ленинская кузница» построил цельносварной буксирный пароход «Белоруссия» мощностью 150 л. с. и водоизмещением 128 т. В 1931 г. на заводе «Электросила» было сварено 18 корпусов турбо- и газогенераторов, а в 1933 г. были изготовлены цельносварные гидрогенераторы мощностью 2000 кВт для энергосистем.

В 1932 г. Коломенский локомотивный завод построил первый советский цельносварной электровоз ВЛ-19-01.

На харьковском заводе «Серп и молот» сварку применяли для изготовления молотилок. Краматорские заводы изготавливали тяжелые сварные металлургические краны и большегрузные транспортные тележки для изложниц.



Рис. 2.6. Евгений Оскарович Патон (1870–1953)

В январе 1934 года на базе лаборатории сварки Электросварочного комитета и кафедры инженерных сооружений Киевского политехнического института по инициативе Евгения Оскаровича Патона (рис. 2.6) был создан «Институт электросварки АН УССР», ныне – Институт электросварки имени Е. О. Патона Национальной академии наук Украины.

К числу первых значимых достижений академика Е. О. Патона относят создание электродной проволоки с крестообразным поперечным сечением для автоматизации дуговой сварки покрытыми электродами. Металлическая основа (заготовка) представляла собой стержень с ребрами, обеспечивающий электрический контакт. Пространство между ребрами заполнялось шихтой (обмазкой). Покрытие настолько прочно удерживалось на стержне, что легко допускало сворачивание проволоки в бухту и не повреждалось при подаче через ролики.

В 1937 г. в покрытие сварочных электродов начали вводить дополнительный металлический материал для интенсификации плавления присадочного материала, а на металлические стержни диаметром 4,0; 5,0 и 6,0 мм с предварительно нанесенным тонким покрытием наматывать спираль из проволоки малого диаметра с последующим нанесением второго слоя покрытия. Это позволило повысить коэффициент наплавки до 2 раз по сравнению с промышленными электродами без металлических добавок. С тех пор началась систематическая разработка высокопроизводительных сварочных электродов, в том числе с различными типами покрытий, позволяющими проводить сварку в различных положениях.

В 1938 г. на Киевском заводе «Ленинская кузница» был внедрен первый в СССР сварочный трактор конструкции Института электросварки, который сваривал металл открытой дугой. Это позволило освоить автоматическую сварку в производстве ответственных конструкций (вагоны, котлы, корпуса судов).

В настоящее время разработана широкая гамма электродов различного назначения с основным, рутиловым, рутило-основным и другими типами покрытий. Совершенствование электродов продолжается и в настоящее время.

Параллельно в мире развивались и другие направления защиты зоны сварки. В 1930 г. в США выдан патент Б. С. Робинову, С. Е. Пейку и В. Е. Квиллену на способ сварки, при котором дуга была защищена флюсом, который непрерывно высыпался из бункера перед электродом, и, расплавляясь, образовывал надежную шлаковую и газовую защиту. Способ был успешно использован в производстве стальных труб толщиной до 16 мм за один проход. А в 1935 году сотрудниками американской фирмы «Линде» был разработан состав флюсов и способ сварки стальных листов толщиной до нескольких десятков миллиметров со скоростью до 10 м/ч, названный «Юнионмелт». Разработанный автомат для сварки содержал устройство для подсыпки флюса в зону сварки и обеспечивал качественную

сварку таких ответственных конструкций, как рамы и кузова электровозов, корпуса барж и сухогрузов, станины различных машин, сосуды, работающие под давлением.

С начала 1940-х годов непрерывная сварка с автоматической подачей прутка с флюсовым покрытием широко использовалась на японских верфях для сварки протяженных горизонтально-вертикальных угловых швов.

В СССР разработкой аппаратуры и способов автоматической сварки с керамическим флюсом занимались специалисты МВТУ им. Н. Э. Баумана. Значительный вклад в развитие электродуговой сварки под флюсом внесли сотрудники Института электросварки.

В годы Великой Отечественной войны Институт электросварки находился в эвакуации в Нижнем Тагиле, однако работы по усовершенствованию технологий сварки, сварочных агрегатов, разработке новых флюсов и электродов для толстолистовых деталей военной техники продолжались. Так, корпус первого сварного русского танка Т-34, спроектированного О. Е. Патонем, был собран с применением автоматизированной линии сварки под флюсом. Именно технология автоматической сварки под флюсом обеспечила превосходство советского производства танков над немецким, которое до конца войны так и не освоило технологию автоматической дуговой сварки. В мае 1944 г. Институт электросварки возвратился из Нижнего Тагила в Киев. До конца года были модернизированы сварочные головки, и автоматическая сварка под флюсом была успешно внедрена на двенадцати крупных предприятиях СССР, в том числе на Киевском заводе «Ленинская кузница», Днепропетровском заводе металлоконструкций им. В. М. Молотова.

В послевоенные годы технология автоматической сварки под флюсом непрерывно совершенствовалась. А к 1960-му году был разработан процесс сварки под флюсом несколькими плавящимися электродами, подаваемыми в общую сварочную ванну. Процесс позволил увеличить скорость сварки и повысить гибкость процесса.

История электросварки с использованием газовой защиты берет свое начало с 1930-х годов, когда в США был проведен ряд экспериментов по горению дуги с вольфрамовым электродом в атмосфере инертного газа. А с 1940 года начала осваиваться практика сварки неплавящимися электродами (вольфрамовыми или с вольфрамовым покрытием) в атмосфере гелия. В 40-е годы в Институте электросварки для защиты зоны сварки стали применять инертные газы. Со временем чаще стал использоваться аргон как более эффективный и безопасный, а для сварки алюминиевых сплавов и реакционноспособных металлов стали применять газы повышенной чистоты (до 99,95 %).

В 1948 году была разработана дуговая сварка плавящимся проволочным электродом в среде инертных газов. А к концу 50-х годов XX века на основании результатов исследований, проводимых в СССР, Великобритании, Нидерландах и Японии, были разработаны технологии сварки с использованием углекислого газа в качестве защиты. В Советском Союзе технологию дуговой сварки в углекислом газе разработали сотрудники Сварочного комбината (сейчас – ЦНИИТМАШ) К. В. Любавский и Н. М. Новожилов.

Во второй половине XX в. активно разрабатывались и другие технологии сварки, например, дуговая сварка порошковой проволокой в защитном газе и без него, электрогазосварка, дуговая сварка плавящимся электродом в смеси газов ($\text{Ar} + \text{CO}_2$) и т. д., которые позже стали широко применять во всем мире. Сейчас различные виды автоматической дуговой сварки играют значительную роль при получении неразъемных соединений в самых разных отраслях промышленности.

2.1.3. Разработка контактной сварки

Изобретателем стыковой контактной сварки (сварки сопротивлением) считают преподавателя химии и механики, известного изобретателя, американца Эльхью Томсона (1853–1937). В феврале 1877 г. во время одной из лекций в Институте Франклина Томсон, демонстрируя зарядку конденсатора от искровой катушки, неожиданно подумал: «Что случится, если заряд пойдет обратно при разряде конденсатора на катушку?» Томсон скрутил между собой концы толстого провода первичной катушки, а на вторичную тонкую обмотку подал напряжение. Разряд тока через тонкую обмотку привел к возникновению большой силы тока в первичной обмотке и сплавлению скрученных концов провода из-за роста электрического сопротивления и выделения значительного количества теплоты. Это положило начало разработке новой технологии сварки.

В 1880 г. Томсон совместно с другим преподавателем Центральной высшей школы в Филадельфии Э. Дж. Хаустоном организовал фирму по производству оборудования для электрического освещения, в 1884 г. он сконструировал мощный трансформатор и специальные клещи-тиски для зажима свариваемых брусьев, а в 1886 г. получил два первых патента на стыковую контактную сварку.

В последующие несколько лет Томсон с сотрудниками получил около 150 патентов в области контактной сварки (на гибкий токоподвод, износостойкие токоподводящие зажимы, минимальные переходные электрические сопротивления). А в 1892 г. он основал фирму «Томсон электрик уэлдинг» и начал выпускать оборудование для стыковой контактной сварки. В том же году способом Томсона впервые в мире были сварены железнодорожные рельсы, а через несколько лет таким способом удлиняли трамвайные рельсы во многих городах США.

Другой способ контактной сварки – точечную контактную сварку – изобрел Н. Н. Бенардос, получивший на него немецкий патент № 46776. Еще до разработки «электрогефеста» он предложил подвести ток к двум лежащим одна на другой стальным пластинам с помощью клещей, в которые вставил угольные электроды. Протекание тока через электроды, между которыми были зажаты пластины, приводило к выделению теплоты, достаточной для образования области сварки. В результате формировалось так называемое точечное сварное соединение, похожее на заклепочное, но без выступающих головок, которое получали более производительным способом.

В конце XIX в. немецкий изобретатель О. Кляйншмидт заменил угольные электроды медными, улучшил токоподвод и усилил механическое давление электродов на металл. Оказалось, что таким способом можно соединять изде-

лия из алюминия. Вскоре этот способ уже использовали для сварки стальной обшивки вагонов, производства металлической посуды, изготовления деталей осветительных приборов, мебельной фурнитуры, деталей автомобилей.

Американский изобретатель Чарльз Альберт Коффин, больше известный как первый президент фирмы General Electric, также предложил целый ряд оригинальных идей и усовершенствований, эффективно используя возможности комбинирования дуговой и контактной стыковой сварки.

Среди изобретений Коффина: комбинированный процесс сварки с использованием нагрева места соединения дугой косвенного действия (до размягчения или расплавления кромок) и последующего сжатия; принципиально новое взаимное расположение электродов, свариваемого изделия и дуги; роликовый металлический электрод; сварка двойной дугой; сварка плавящимся и неплавящимся электродом одновременно. Занимался Коффин и сваркой в защитной атмосфере, в камерах со сжатым воздухом, а также в условиях пониженного давления и под водой, пытаясь предотвратить образование в швах оксидов и нитридов.

В первом десятилетии XX в. контактная сварка начала применяться для создания ответственных изделий, работавших под нагрузкой и при повышенных температурах (деталей автомобилей и сельскохозяйственных машин; в производстве двигателей и оборудования для химической промышленности). В СССР это направление развивалось в ЦНИИТМАШ, на заводе «Электрик», в «Институте электросварки им. Е. О. Патона», МВТУ им. Н. Э. Баумана, ВНИИЭСО и других организациях. На ГАЗе контактную сварку применяли при производстве автомобилей.

2.1.4. Разработка газовой сварки

Разработка процесса газовой сварки связана с открытием и исследованием водорода и ацетилена, и началом промышленного производства кислорода, водорода и ацетилена в конце XIX века. Электроэнергия в это время была дорогой, и, параллельно с развитием электросварки, начал развиваться еще один способ сварки плавлением, основанный на использовании теплоты сгорания горючих газов.

Считается, что впервые термин «газовая сварка металлов» употребил французский изобретатель Д. де Рисимен в статье «Описание нового способа сварки свинца, названного газовым, и горелки с использованием воздуха и водорода, называемой воздушно-водородной, предназначенной для этой цели», которая была опубликована в сентябре 1840 г.

Следует отметить, что газовые горелки начали разрабатывать гораздо раньше. В лабораторных условиях часто использовали водородно-воздушное и водородно-кислородное пламя, причем последнее имело температуру, достаточную для плавления золота, серебра и платины. Однако промышленное применение газовой сварки получила лишь после разработки промышленной технологии получения ацетилена (C_2H_2), теплота сгорания которого более чем в пять раз выше теплоты сгорания водорода.

Первую ацетилено-кислородную сварочную горелку сконструировали французские инженеры Э. Фуше и Ш. Пикар, которые получили патент в 1903 г. Предложенные ими конструктивные схемы газосварочных горелок применяются до сих пор.

В России технология газовой сварки была впервые продемонстрирована в Московском техническом училище в 1906 г.

Промышленные предприятия начали применять ацетилено-кислородную сварку, начиная с 1906 г., когда появились достаточно надежные конструкции ацетиленовых генераторов. Именно этот вид сварки положил начало использованию сварки при производстве транспорта – ацетилено-кислородная сварка стала применяться на автомобильных заводах Германии и Франции.

Простота, мобильность и невысокая стоимость оборудования сразу обеспечили газовой сварке лидирующие позиции в промышленности, которые она сохраняла до 30-х годов XX века. Рост использования газовой сварки наблюдался также в годы Второй мировой войны.

Мощный импульс в развитии газовой сварки связан с созданием в 1944 г. по инициативе академика П. Л. Капицы специализированного Всесоюзного научно-исследовательского института автогенной обработки металлов (ВНИИавтоген, ныне ФГУП ВНИИавтогенмаш). Создается оборудование для газофлюсовой сварки и наплавки, «низкотемпературной» пайко-сварки чугуна и цветных металлов и т. п. Кроме газовой и газoeлектрической сварки получают развитие и другие процессы газопламенной обработки (термическая резка, газотермическое напыление покрытий, наплавка, газопламенная пайка).

Вопросами газопламенной обработки в СССР занимались и другие научно-исследовательские организации, например, сварочные лаборатории МВТУ им. Н. Э. Баумана, Киевского и Ленинградского политехнических институтов, ЦНИИ Министерства путей сообщения, базовые сварочные лаборатории при некоторых крупных промышленных предприятиях и отраслевых институтах.

В настоящее время газовая сварка осуществляется с использованием высокопроизводительного оборудования, а по объему работ с применением этого вида сварки Россия занимает ведущее место среди технически развитых стран.

2.1.5. Разработка электрошлаковой сварки

Электрошлаковая сварка появилась сравнительно недавно. Считается, что технология электрошлаковой сварки была запатентована в США Робертом К. Хопкинсом (англ.: Robert K Hopkins) в феврале 1940 года (патент № 2191481). Однако значимые усовершенствования в эту технологию были предложены сотрудниками Института электросварки имени Е. О. Патона АН УССР во главе с Георгием Зосимовичем Волошкевичем.

В 40-е годы автоматическая дуговая сварка была возможна только в нижнем положении. Для сварки многих объектов (мостов, зданий и т. д.) необходимо было создать оборудование и технологию автоматической сварки швов, располагающихся на вертикальных и наклонных плоскостях. Решать проблему сварки вертикальных швов Е. О. Патон поручил Волошкевичу.

После длительных поисков Волошкевич предложил попробовать способ, который позже назовут «принудительным формированием сварочной ванны»: с двух сторон зазор между свариваемыми торцами прикрывался медными ползунами и накладками. Чтобы предохранить медь от расплавления, температура плавления которой ниже, чем у стали. Волошкевич предложил охлаждать накладки. Шлак на охлаждаемых водой ползунах застывал, и образующаяся корочка предохраняла жидкий металл от вытекания и приваривания к меди. Ползун скользил и обеспечивал хорошее формирование шва. Впервые в мире, в 1948 г. на заводе «Запорожсталь», Г. З. Волошкевичем были сварены автоматом в монтажных условиях четыре пояса строящейся доменной печи. Со следующего года началось массовое применение вертикальной сварки. Трудоемкость сборочно-сварочных операций снизилась в несколько раз.

При исследовании возможности повышения устойчивости дуги обнаружилось, что процесс можно осуществить и без нее. Так, иногда электродный металл, флюс и кромки плавилась, а осциллограммы показывали, что дуга погасла. Волошкевич заинтересовался такими случаями и установил, что при некоторых условиях плавление происходит за счет «джоулевого» тепла, выделяющегося при прохождении тока через жидкий шлак. К решению проблем управления этим процессом приступил заведующий электротехническим отделом Борис Евгеньевич Патон.

В 1949 году Г. З. Волошкевич и Б. Е. Патон добились высокой стабильности процесса при сварке за один проход соединений значительной толщины. Б. Е. Патон показал возможность саморегулирования процесса, разработал соответствующее оборудование (рис. 2.7) и начал проводить системные исследования физических и металлургических особенностей нового вида сварки.



Рис. 2.7. Б. Е. Патон и Г. З. Волошкевич у нового аппарата электрошлаковой сварки

В 1956 г. под редакцией Б. Е. Патона была издана первая в мире монография «Электрошлаковая сварка», а в 1958 г. на Всемирной выставке в Брюсселе новый вид соединения был удостоен высшей награды – Гран-При.

Этот вид сварки позволил кардинально изменить стратегию развития тяжелого, энергетического и транспортного машиностроения. С ее использованием стало возможным изготавливать мощные машины и ответственные конструкции, причем не только из стали, но и из алюминиевых, титановых и других сплавов. Технологию начали использовать на последнем этапе создания изделий любой формы практически неограниченных размеров и массы из отлитых, кованных и прокатанных заготовок сравнительно небольшой массы, формируя сварно-литые, сварно-кованные, сварно-прокатанные конструкции.

Одновременно с развитием сварочной технологии разрабатывалась электрошлаковая наплавка, в том числе в нижнем и вертикальном положении с использованием формирующих ползунов, и стыко-шлаковая наплавка.

Б. Е. Патон установил, что с помощью электрошлакового переплава можно получать металлы особо высокого качества.

До середины XX века электросварка занимает ведущие позиции во всех отраслях промышленности. С использованием электросварки возводятся небоскребы, прокладываются инженерные коммуникации, развивается промышленность и наука. При этом самой распространенной, доступной и дешевой является электродуговая сварка. Ручная дуговая сварка и в настоящее время остается основным технологическим процессом при ремонтных и строительных работах.

2.1.6. Разработка альтернативных методов сварки

Появление *термитной сварки* связано с открытием русским ученым-химиком Николаем Николаевичем Бекетовым алюминотермических реакций, при которых активный алюминий восстанавливает оксиды других металлов, образуя собственный оксид. Такие реакции сопровождаются выделением значительного количества тепла и могут идти без доступа воздуха. В процессе реакции оксиды восстанавливаются до металла, а второй компонент образует оксиды, участвующие в образовании шлака. Типичный термит состоит из смеси алюминия с оксидами железа.

Указанные эффекты были использованы профессором Гансом Гольдшмидтом для сварки двух металлических брусков, зазор между которыми он заполнил горящим термитом. В результате образовался прочный сварочный шов, а шлак всплыл на поверхность. В 1895 году Гольдшмидт запатентовал новый способ сварки и показал, что тепловую энергию, выделяющуюся при реакции оксида металла с алюминиевым порошком, можно использовать для сварки массивных металлических деталей.

1 января 1919 года в районе Темпельхоф в Берлине была основана компания Elektro-Thermit G.m.b.H, с которой началось активное развитие термитного способа сварки. Однако коммерчески успешное освоение термитной сварки рельсов немецких железных дорог произошло лишь к 1928 году.

В Москве термитную сварку впервые применили для ремонта рельс в 1915 г., а к 1923 г. все трамвайные пути в столице ремонтировали только термитной сваркой, однако использовали импортный термит. В 1925 году русский инженер Михаил Александрович Карасев запатентовал отечественный термит и организовал

его производство в Москве. Отечественный термит оказался лучше импортных аналогов и обеспечивал более высокое качество сварки и более длительный срок службы сварного соединения.

После Второй мировой войны почти все железнодорожные компании стали использовать термитный способ сварки, а группа компаний Thermit® стала международной организацией и открыла представительства во многих странах: Италия (1950), Индия (1951), Бразилия (1952), Австрия (1952), Англия (1958), США (1967), Австралия (1986), Чехия (1993) и Венгрия (1995).

В 1955 году была разработана технология скоростной сварки «SmW», позволившая существенно сократить продолжительность процесса, а в 1972 году метод скоростной сварки был усовершенствован и, получив название «SkV», стал применяться в качестве стандартного метода в компании «Немецкие железные дороги» (DB) и в других железнодорожных предприятиях.

Компании группы Thermit® занимались не только разработкой и усовершенствованием технологии термитной сварки, но и производили необходимое оборудование и комплектующие (например, гидравлический гратосниматель (1970), автоматическую пробку тигля (1982) или ЕВРО-тигель для однократного использования (1998)).

Технологию начали применять для сварки стыков труб высокого давления, где использовалась легированная сталь особой прочности. Термиты нашли применение и для ремонта валов большого диаметра и других крупных деталей из металла.

Термитная сварка успешно используется и в настоящее время. Она позволяет одинаково легко сваривать черные и цветные металлы без применения дополнительного оборудования. При условии тщательного соблюдения технологии даже в полевых условиях (рис. 2.8) формируется прочный, качественный и эстетичный шов.



Рис. 2.8. Термитная сварка железнодорожных рельсов

Со второй половины XX века начинают развиваться новые эффективные технологии соединения не только металлов, но и других материалов. К их числу относится сварка взрывом (рис. 2.9).

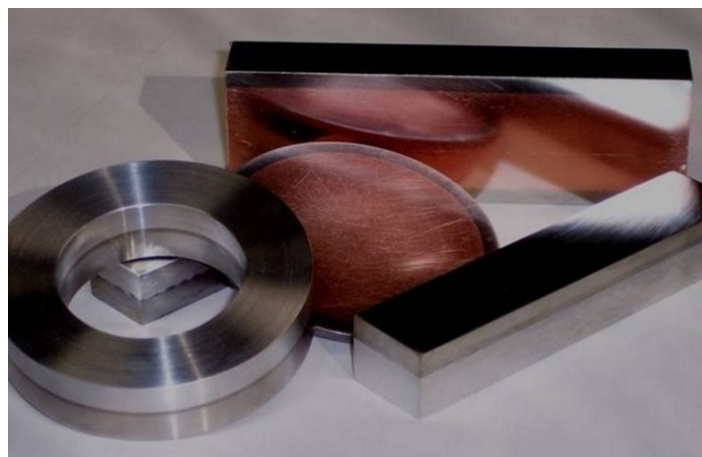


Рис. 2.9. Примеры изделий, полученных сваркой взрывом

Возможность *сварки взрывом* была установлена во время Второй мировой войны, когда после разрыва бомб были найдены фрагменты гильз, сваренные с другими металлическими предметами. В начале 1960-х годов американская компания DuPont разработала технологический процесс сварки взрывом и запатентовала его в США. С тех пор эта технология сварки начала активно развиваться и применяться во многих областях промышленности (от изготовления биметаллов для нефтяной промышленности до герметичных соединений в электронике), позволяя достичь намного большего по сравнению с известными методами срока службы изделий (до 30 лет).

Начало истории *диффузионной сварки* связывают с эффектом повышения скорости взаимной диффузии, установленным советским физиком, доктором технических наук Николаем Федоровичем Казаковым в 1953 г. при нагреве соединяемых заготовок в вакууме с приложением давления. Оказалось, что таким способом можно соединять детали из разных металлов. Международным институтом сварки было принято следующее определение метода: «Диффузионная сварка материалов в твердом состоянии – это способ получения неразъемного соединения, образовавшегося вследствие возникновения связей на атомарном уровне, появившихся в результате сближения контактных поверхностей за счет локальной пластической деформации при повышенной температуре, обеспечивающей взаимную диффузию в поверхностных слоях соединяемых материалов».

Уже первые результаты показали, что такой способ позволяет формировать сплошной однородный сварной шов, не содержащий оксидов, пор, раковин и других дефектов, со стабильными механическими характеристиками. И при этом не требуется использования дорогостоящих припоев, специальной проволоки и электродов, флюсов, защитных газов, а также последующей механической обработки. Свойства металла в зоне соединения практически не меняются, поэтому термическая обработка необязательна. Наконец, процесс диффузионной сварки можно отнести к экологически чистым (отсутствуют ультрафиолетовое излучение, вредные брызги металла, мелкодисперсная пыль).

Первоначально диффузионную сварку применяли для изготовления крупногабаритных деталей сложной формы, получение которых другими методами

сложно либо неэффективно (колеса и лопатки турбин, клапаны, поршни и гильзы цилиндров двигателей, штампы и др). Диффузионная сварка титана и его сплавов нашла широкое применение в медицине для изготовления деталей протезов.

В последние годы отношение к диффузионной сварке изменилось. Технология рассматривается как альтернативный вид сварки как крупногабаритных, так и небольших заготовок и успешно конкурирует с другими традиционными видами сварки (рис. 2.10).

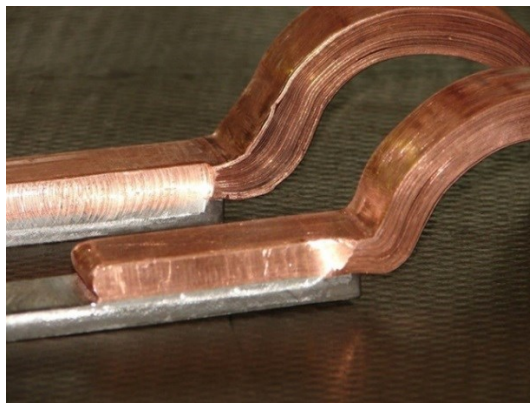


Рис. 2.10. Диффузионная сварка меди и алюминия

Появление *сварки трением* связывают с именем токаря Эльбрусского рудника А. И. Чудикова. В опубликованном им 28 августа 1956 г. в газете «Труд» письме он сообщал о разработанном им способе сварки «методом трения», основанном на использовании тепловой энергии, выделяющейся при вращении одной заготовки относительно другой. Изобретением заинтересовались во Всесоюзном научно-исследовательском институте электросварочного оборудования (ВНИИЭСО – нынешний Институт сварки России). Первые эксперименты, выполненные сотрудниками ВНИИЭСО В. И. Биллем и Л. А. Штерниным, подтвердили перспективность сварки трением в случае, если одна из заготовок представляет собой тело вращения, и послужили отправной точкой для систематических исследований в этом направлении. В 1959 г. на Сестрорецком инструментальном заводе была опробована первая машина для сварки металлов трением, используемая для сварки заготовок инструмента. После этого был организован серийный выпуск различных типов машин на Волковысском заводе литейного оборудования, Гомельском станкостроительном заводе и Краматорском заводе тяжелого станкостроения.

А в 1991 году в Британском Институте Сварки (TWI) была разработана инновационная технология сварки трением с перемешиванием, основанная на вращении специального инструмента. Спустя некоторое время были разработаны способы сваривания алюминиевых сплавов и их модификаций, применяющихся в строительстве самолетов и морских судов.

Первыми компаниями, запустившими новую технологию в производство, были норвежская Marine Aluminium и американская Boeing. На своих предприятиях они использовали сварочное оборудование концерна ESAB, специализирующегося на разработках в области ротационной сварки трением (РСТ).

Изначально сварка трением с перемешиванием разрабатывалась для работы с легкоплавкими металлами, такими как алюминий (660 °С). Однако позднее метод стал применяться для соединения более тугоплавких металлов: никеля (1 455 °С), титана (1 670 °С), железа (1 538 °С).

В 2012 году компания «Хонда» применила сварку трением с перемешиванием для соединения стали и алюминия при производстве подрамников своих автомобилей.

Сегодня сварка трением с перемешиванием (рис. 2.11) успешно используется при изготовлении изделий в автомобиле-, вагоно-, корабле- и ракетостроении.

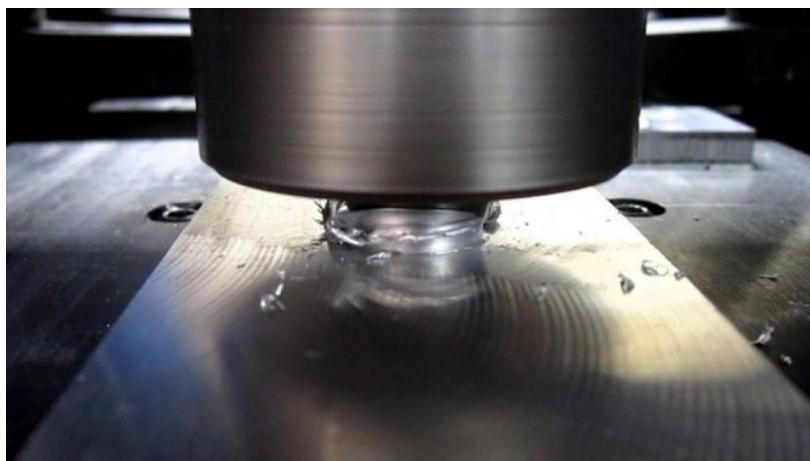


Рис. 2.11. Сварка трением с перемешиванием

2.1.7. Разработка лучевых видов сварки

Полученные в XX веке научные результаты в области оптики и квантовой физики способствовали разработке новых видов сварки, основанных на использовании энергии ионных и фотонных лучей, – лучевой сварки. Внедрение технологий с использованием высококонцентрированных источников энергии (плазмы, электронного и лазерного луча) позволило значительно повысить производительность процессов и обеспечить новые уникальные возможности соединения заготовок.

Первые сварочные плазмотроны были сконструированы на базе горелок для аргоно-дуговой сварки неплавящимся электродом примерно в середине 50-х гг. XX в. Они отличались использованием водоохлаждаемой металлической камеры, полностью охватывающей вольфрамовый электрод, и на выходе имели сопло, соосное электроду и соизмеримое с диаметром столба дуги. Проходящий под давлением между водоохлаждаемыми стенками камеры и столбом дуги газ охлаждал и сжимал столб, а также обеспечивал его тепловую и электрическую изоляцию от стенок сопла. Применение аргона обеспечивало высокую стойкость вольфрамовых электродов, легкость зажигания дуги и низкое ее напряжение, что было особенно благоприятно для ручного способа сварки. До середины 60-х гг. прошлого века были разработаны ручные и механизированные установки. Одновременно разрабатывались катоды плазмотронов из циркония и гафния.

При обычной дуговой сварке дуга горит свободно между электродом и изделием. Однако если при помощи каких-либо приемов не дать возможность дуге занять ее естественный объем, а сжать ее, то температура дуги значительно повышается.

Для применения плазменной струи для сварки металлов необходимо было решить сложную проблему – сохранив высокую тепловую мощность столба дуги, уменьшить ее силовое воздействие, которое выдувает металл из сварочной ванны и вызывает неудовлетворительное формирование шва. Исследования, проводившиеся в СССР и за рубежом, показали, что для решения вышеуказанной проблемы необходимо найти рациональное соотношение основных технологических характеристик процесса: величины сварочного тока, длины дуги и расхода плазмообразующего газа.

Развитие плазменной сварки в СССР связано с именем Николая Николаевича Рыкалина (рис. 2.12), под руководством которого в Институте металлов им. А. А. Байкова (ныне – ИМЕТ им. А. А. Байкова) проводились исследования физических и энергетических свойств сжатой дуги в аргоне.

Было разработано несколько технологических схем процесса плазменной сварки. Для сварки тонколистовых материалов применены малоамперные дуги, горящие в импульсном режиме. Импульсный подвод тепла к металлу позволил расширить область регулирования теплового режима сварки и существенно уменьшить теплопередачу в кромки металла. Для расширения диапазона толщин металлов, свариваемых сжатой дугой, было предложено снизить степень обжата дуги с одновременным увеличением диаметра канала сопла. Это позволило сваривать нержавеющие стали и алюминиевые сплавы толщиной 10 мм.

Сегодня плазменная сварка (рис. 2.13) применяется при соединении некоторых марок нержавеющих сталей, тугоплавких и многих цветных металлов, а также изделий из других материалов. К числу недостатков плазменной сварки относятся частичное рассеивание энергии в пространство, потребность в плазмообразующем газе и охлаждении плазмотрона водой, высокую стоимость оборудования.

Исследования по применению для сварки малоамперных дуг привели к созданию микроплазменной сварки. Считают, что первые технологии микроплазменной сварки были разработаны в 1965 г. в Швейцарии на фирмах «Сешерон» и «Мессер-Грисхайм». Для микроплазменной сварки были разработаны малогабаритные горелки с вольфрамовым электродом.

В настоящее время микроплазменная сварка применяется в самолетостроении, атомной, газовой, электронной, медицинской и других отраслях промышленности для изготовления сильфонов, миниатюрных трубопроводов, полупро-



Рис. 2.12. Николай Николаевич Рыкалин (1903–1985)

водниковых приборов и многих других изделий. Данным способом сваривают листы толщиной 0,025–0,8 мм из черных и цветных металлов и сплавов (низкоуглеродистой и нержавеющей стали, меди, никелевых сплавов, титана, молибдена, тантала, вольфрама, золота).



Рис. 2.13. Плазменная сварка

Ожидается, что в течение ближайших десятилетий микроплазменная сварка останется одним из основных способов соединения тонколистовых металлов и сплавов.

Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) основана на использовании тепла, которое выделяется при торможении остросфокусированного потока электронов, ускоренного до высоких энергий. Этот эффект был зафиксирован еще в конце XIX века, однако начал использоваться для сварки только после создания вакуумной техники и развития электронной оптики.

Разработка методов ЭЛС была обусловлена необходимостью осуществления сварки заготовок из трудносвариваемых тугоплавких и химически активных металлов и сплавов (молибдена, циркония, вольфрама, ниобия, тантала, бериллия, титана), широко используемых в химическом машиностроении, реакторостроении, электронном приборостроении, корпусных узлах летательных и космических аппаратов и других областях.

Технологии ЭЛС были разработаны почти одновременно во Франции, США и СССР. Работы французских и американских инженеров Д. А. Стора, Д. Бриолы, В. Л. Вимена были опубликованы в 1957–1958 гг. У истоков появления ЭЛС стоял также К. Г. Штайгервальд (ФРГ).

Примерно в это же время независимо от иностранных ученых электронно-лучевой сваркой в СССР начали заниматься в Московском энергетическом институте под руководством Н. А. Ольшанского и в Институте электросварки им. Е. О. Патона под руководством Б. А. Мовчана.

В 1964 г. американский ученый М. Шварц на основе экспериментальных данных, полученных при помощи скоростной киносъемки, установил, что процесс взаимодействия луча и металла происходит за счет испарения и носит прерывистый характер. Было также установлено, что распределение температур по глубине канала неравномерно: в корневой части канала $T \sim 5\,000\text{ К}$, а у выходной части канала она минимальна и составляет $2\,500\text{--}3\,000\text{ К}$.

Позднее Н. Н. Рыкалин и И. В. Зуев предложили теорию формирования канала проплавления за счет периодического выброса вещества вследствие взрывообразного испарения (вскипания) металла.

А в 1969 г. американские ученые Гид и Тонг провели экспериментальные исследования процесса образования канала с помощью киносъемки в рентгеновских лучах и установили, что в жидком металле вокруг электронного луча существует полость, глубина которой периодически колеблется с частотой от 0 до 10–60 Гц.

Дальнейшие работы советских и зарубежных ученых были посвящены изучению возможности управления ЭЛС, а также разработке гибридных технологий сварки и программных комплексов компьютерного анализа процессов.

Сегодня ЭЛС, несмотря на сравнительно высокую стоимость, относится к числу перспективных способов соединения различных материалов, а область ее использования постоянно расширяется.

Лазерная сварка возникла благодаря открытию нового принципа генерации и усиления света, сделанному в 1952 г. физиками Н. Г. Басовым, А. М. Прохоровым (СССР) и Ч. Таунсоном (США), получившими за это открытие Нобелевскую премию. На основе этих работ в начале 60-х годов XX в. в США был создан первый оптический квантовый генератор для сварки – лазер на рубине.

Слово «лазер» является аббревиатурой английского словосочетания Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, что в переводе на русский язык означает «усиление света посредством вынужденного излучения». Угловая расходимость светового пучка лазерного излучения мала, и при фокусировке пучка до размеров диаметра светового пятна порядка нескольких микрон можно не только расплавить все известные материалы, но и испарить их. На этом основана лазерная сварка.

В СССР первые лазерные установки для сварки были разработаны в 1964–1966 гг. Однако первоначально качество сварных швов было низкое и нестабильное. Лишь в 1969 г. был освоен выпуск серийной сварочной установки СЛС-10-1, предназначенной для сварки деталей толщиной до 0,3 мм, которая обеспечивала высокие технологические характеристики.

Активные разработки лазерных устройств во многих странах привели к появлению в семидесятых годах как твердотельных (рубин, неодимовые стекла), так и газовых лазеров, использующих в качестве излучателей газы и газовые смеси (инертные газы, углекислый газ, смесь $\text{CO}_2 - \text{N}_2 - \text{He}$). Газовые лазеры позволили значительно повысить мощность излучения и коэффициент полезного действия (КПД – до 20 %), осуществлять сварку в непрерывном режиме, а также сваривать изделия значительной толщины (50 мм и более) при мощности непрерывного излучения в несколько десятков киловатт.

Преимуществами лазерной сварки (рис. 2.14) являются высокая локальность нагрева, кратковременность воздействия лазерного луча на свариваемый металл и возможность осуществления сварки в любой среде, пропускающей свет (в вакууме, инертных газах, на воздухе, а также деталей, заключенных в герметические стеклянные оболочки).



Рис. 2.14. Лазерная сварка

Несмотря на сравнительно низкий КПД лазеров, в настоящее время лазерная сварка успешно применяется в промышленности. Наиболее эффективно ее использование в производстве изделий электронной, радиотехнической промышленности, в точном приборостроении, при получении микроминиатюрных элементов (приварка выводов к тонкопленочным схемам, микромодулям, полупроводниковым устройствам).

2.1.8. Сварка в ядерной энергетике

В начале XX века ученые многих стран начали проводить исследования в области ядерной физики, приведшие позднее к созданию атомных электростанций. Большой объем монтажных работ таких объектов требовал разработки соответствующих методов и технологий сварки.

В 1956 г. Министерство средней промышленности СССР создает проектно-монтажное управление для осуществления комплексных разработок технологических процессов, специального оборудования и оснастки для монтажа сложных ядерных объектов, а в 1961 г. на его основе создается Научно-исследовательский и конструкторский институт монтажной технологии – НИКИМТ, который с 1963 г. на постоянной основе занимается вопросами разработки, изготовления и внедрения комплексов специального автоматизированного сварочного оборудования для производства регламентных и ремонтных работ.

В середине семидесятых годов XX века в СССР начинает активно развиваться строительство атомных электростанций и постановлением Правительства СССР НПО ЦНИИТМАШ назначается головной организацией в области материаловедения, сварки и неразрушающего контроля в атомном энергомашиностроении. С этого периода начинается его активное сотрудничество с заводами-изготовителями оборудования для АЭС («Ижорский завод», ЗиО им. Орджоникидзе, ПО «Турбоатом», ПО «Атоммаш», ПО «Красный котельщик» и другие), а также атомными станциями. Для сварки новых теплоустойчивых высокопрочных сталей реакторных установок разрабатываются соответствующие сварочные материалы (сварочная проволока, электроды, флюсы).

В 2006 г. НИКИМТ реорганизован во ФГУП «Инвестиционно-строительный концерн «Росатомстрой», который позднее преобразован в ОАО «Инвестиционно-

строительный концерн «Атомстрой» и переименован в ОАО «НИКИМТ-Атомстрой». А в 2010 г. ОАО «НИКИМТ-Атомстрой» входит в контур управления ОАО «Атомэнергопроект» и занимается разработкой оборудования для автоматической электронно-лучевой сварки твэлов, технологий и оборудования автоматической сварки для ремонта трубопроводов. Создается уникальный комплекс автоматической многофункциональной орбитальной сварки кольцевых стыковых соединений большого диаметра изнутри труб. Совместно с НПО «Сплав-Ти» разрабатывается и внедряется новая отечественная сварочная проволока из титановых сплавов. Разрабатывается и утверждается технологическая документация по неразрушающему контролю сварных соединений трубопроводов строящейся Нововоронежской АЭС-2.

В 2014 г. АО «НИКИМТ-Атомстрой» входит в контур управления Инжинирингового дивизиона Госкорпорации «Росатом». На сегодняшний день это единственная организация Госкорпорации «Росатом», имеющая компетенции в области автоматизации сварки и контроля. Здесь создана школа специалистов, работающих по созданию оборудования и оснастки для сварки при изготовлении, выполнении ремонтных и регламентных работ ППУ АПЛ и других ядерных объектов по направлениям «сварка в ядерной промышленности и энергетике» и «сварка в монтажном и ремонтном производстве». Первое направление распространяется на производство изделий активной зоны реакторов: ТВЭЛ, ПЭЛ, ТВС и др., исполнительных элементов систем управления, радиоизотопных капсул и других изделий.

Продукция и услуги ОАО «НИКИМТ-Атомстрой» поставляются на все действующие и строящиеся энергоблоки страны, на предприятия ядерно-топливного цикла, малой энергетики, нефтегазового комплекса (рис. 2.15, 2.16).



Рис. 2.15. Лазерная сварка в атомном энергомашиностроении

14 марта 2023 года в Курске в рамках конференции «Профессионалитет – взгляд в будущее» стартовала первая волна обучения преподавателей Курского монтажного техникума по программе «Атомные школы сварки». Ожидается, что до конца 2023 года в России будет аккредитовано пять «Атомных школ

сварки» на базе российских учебных заведений профессионального образования, с целью формирования развернутой сети центров подготовки квалифицированных сварщиков для атомной отрасли.



Рис. 2.16. Роботизированный комплекс электродуговой сварки неплавящимся электродом в инертном газе для ядерной энергетики

2.1.9. Сварка в космосе

Идея осуществления сварки в космосе принадлежит советскому конструктору и ученому С. П. Королеву. В 1964 он организовал серьезное обсуждение возможности использования сварочных процессов для строительства и ремонта орбитальных станций в космосе. Вскоре стартовала соответствующая программа исследований, включающая несколько этапов.

Первый этап включал разработку экспериментального сварочного оборудования для нескольких наиболее перспективных методов сварки в космосе с питанием от аккумуляторных батарей. Одновременно разрабатывались вакуумные стенды, имитирующие условия в космосе.

На втором этапе несколько методов сварки исследовали на Земле, используя стенды, имитирующие, насколько это было возможно, космический вакуум и колебания температуры, типичные для космического пространства. На этом этапе определяли также базовые технологические параметры процессов.

На третьем этапе сварочное оборудование и испытательные стенды размещали в больших вакуумных камерах для имитации работы в космосе, находящихся в летающей лаборатории на базе Ту-104, и имитировали нулевое состояние гравитации и эффект свободного пространства.

На четвертом этапе сварочное оборудование и технологии тестировали уже в космосе.

В 1965 году в летающей лаборатории на базе Ту-104 были проведены эксперименты по сварке. Во время эксперимента около 50 раз в течение 25–30 секунд имитировали невесомость. В это время осуществляли сварку различными методами. На основании проведенных экспериментов был разработан первый экспериментальный сварочный аппарат для работы в космическом пространстве «Вулкан».

Аппарат соединялся с системами корабля лишь кабелями телеметрии и состоял из двух блоков. В рабочем (негерметичном) находились три сварочных устройства и вращающийся стол с образцами. Во втором (герметичном) блоке размещались приборы управления, средства автоматики и измерений, система энергопитания. Установка имела два пульта управления. Один располагался на крышке рабочего блока, второй (дистанционный) был соединен кабелем с «Вулканом». Источником питания служила аккумуляторная батарея.

Первый эксперимент по сварке металлов в космосе был выполнен 18 октября 1969 года на космическом корабле «Союз-6» летчиками-космонавтами В. Н. Кубасовым и Г. С. Шониным. После разгерметизации орбитального отсека космонавт-оператор В. Н. Кубасов (рис. 2.17), который находился в спускаемом аппарате, в соответствии с программой сначала провел автоматическую плазменную сварку, а затем привел в действие автоматические устройства по сварке электронным лучом и плавящимся электродом.



Рис. 2.17. Сварка в космосе

Эксперименты показали возможность сварки в условиях невесомости и космического вакуума, причем наиболее перспективной для работы в космосе оказалась электронно-лучевая сварка.

Сегодня сварка является ключевой технологией, которая применяется практически во всех сферах и отраслях экономики (тяжелое машиностроение, автомобильная и авиационная промышленность, энергетика, судостроение, промышленное и гражданское строительство).

2.2. Сущность и классификация основных видов сварки

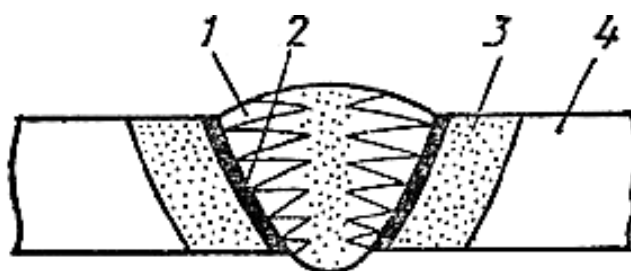
2.2.1. Свариваемость материалов и образование сварных соединений

В соответствии с ГОСТ 2601-84 *сваркой* называется процесс получения неразъемных соединений посредством установления межатомных связей между свариваемыми частями при их местном или общем нагреве, пластическом деформировании либо совместном действии того и другого.

С помощью сварки соединяют между собой однородные и разнородные металлы, их сплавы, металлы с неметаллами (керамикой, графитом, стеклом), а также пластики. Свойства сварных соединений зависят от свариваемости материалов.

Под *свариваемостью* понимают технологическое свойство металла или сочетания металлов образовывать при установленной технологии сварки соединение, отвечающее требованиям, обусловленным конструкцией и эксплуатацией изделия (ГОСТ 29273-92).

Сварное соединение образуется в результате формирования атомно-молекулярных связей между контактирующими поверхностями и содержит несколько областей, схематично показанных на рис. 2.18 (сварной шов – 1, переходную область соединения металла шва с основным металлом (зону сплавления) – 2, зону термического влияния (ЗТВ) – 3 и область основного металла – 4, прилегающую к зоне сварки и имеющую отличную от основного металла структуру).



Сварное соединение: 1 – сварной шов; 2 – зона сплавления;
3 – зона термического влияния; 4 – основной металл.

Рис. 2.18. Сварное соединение

Для осуществления сварки необходимо сблизить кромки соединяемых частей и создать условия, необходимые для формирования межатомных связей. Поверхностные атомы характеризуются наличием свободных, ненасыщенных связей, которые приводят к захвату атомов или молекул, приблизившихся на расстояние действия межатомных сил. Объединение отдельных объемов конденсированной твердой или жидкой фазы в общий объем сопровождается уменьшением свободной поверхности и запаса энергии в системе, и, следовательно, должно идти самопроизвольно. Однако в реальных условиях сближению металлических поверхностей на расстояние, соизмеримое с межатомным, препятствуют микронеровности, оксидные и органические пленки, адсорбированные газы.

Для формирования качественного соединения необходимо освободить свариваемые поверхности от загрязнений и оксидов; сблизить кромки заготовок и сообщить поверхностным атомам некоторую энергию, облегчающую их взаимодействие друг с другом. Эта энергия называется энергией активации и может подводиться в виде теплоты (термическая активация) и/или упругопластической деформации (механическая активация).

В зависимости от метода активации образование связей между атомами соединяемых поверхностей происходит в твердой либо жидкой фазах. В соответствии с этим формирование сварного шва обеспечивается пластическим деформи-

рованием (давлением) и/или термической энергией (нагревом до плавления или высокопластического состояния материала). Таким образом, в зависимости от вида активации можно выделить две основные разновидности процессов сварки: сварка пластическим деформированием (давлением) и сварка плавлением.

При сварке давлением сближение атомов и активация поверхности соединяемых материалов достигаются в результате совместной упругопластической деформации свариваемых кромок. Пластическая деформация сопровождается выравниванием микронеровностей контактирующих поверхностей, разрушением адсорбированных слоев и увеличением числа активных центров взаимодействия, что приводит к образованию соединения.

Сварку давлением можно проводить:

- без предварительного нагрева места соединения (холодная, взрывом, ультразвуковая, трением), когда применяется только механическая энергия;
- с предварительным нагревом (контактная, диффузионная, газопрессовая), когда вместе с механической применяется и тепловая энергия от внешних или внутренних источников теплоты. Предварительный нагрев до пластического состояния или оплавления применяют для труднодеформируемых в холодном состоянии металлов и сплавов.

Нагрев при сварке давлением осуществляется либо за счет дополнительного подвода энергии (пропускание тока, сжигание газов, наведение в заготовках токов высокой частоты и др.), либо за счет частичного преобразования сообщаемой механической энергии в тепловую.

При сварке плавлением детали соединяют за счет местного расплавления металла свариваемых заготовок без приложения давления. Расплавляется либо только основной металл (изделия) по кромкам, либо основной и дополнительный металл – электродный или присадочный.

Расплавленный металл образует общую сварочную ванну. При этом достигается разрушение оксидных пленок, покрывающих поверхность соединяемых заготовок, и сближение атомов до расстояний, при которых возникают металлические связи. После кристаллизации металла образуется сварной шов, имеющий литую структуру.

В зависимости от источника теплоты, используемого для расплавления, выделяют две большие группы сварки плавлением – электрическую и химическую.

При электрической сварке плавлением источником теплоты служит электрический ток. К электрической сварке плавлением относят следующие виды:

- электродуговая, при которой нагрев и плавление осуществляют за счет энергии, выделяемой электрическим дуговым разрядом;
- электрошлаковая, при которой нагрев и плавление металла осуществляются за счет термической энергии, выделяемой током, проходящим через расплавленный флюс (шлаковую ванну);
- электронно-лучевая, при которой энергия, расходуемая на нагрев и плавление металла в месте соединения, выделяется за счет интенсивной бомбардировки быстро движущимися в вакууме электронами;
- плазменная, при которой источником теплоты является струя ионизированного газа;

– лазерная – сварка лучом оптического квантового генератора (лазера), при которой нагрев и плавление металла осуществляются мощным световым лучом.

В случае химической сварки плавлением в качестве источника теплоты используют экзотермическую реакцию (термитная, газовая).

По мере увеличения удельной мощности источника тепла (рис. 2.19) количество подводимой к заготовке теплоты, необходимой для сварки, уменьшается.

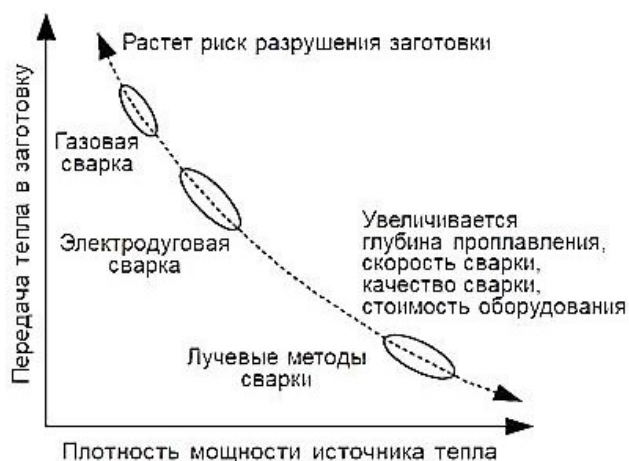


Рис. 2.19. Влияние удельной мощности источника тепла на процессы при сварке

Под воздействием газового пламени материал нагревается сравнительно медленно, и до того, как начинается процесс плавления, большое количество тепла успевает отводиться вглубь заготовки. Чрезмерный нагрев может привести к повреждению заготовки, снижению механических характеристик и деформации.

В то же время материал, подвергнутый воздействию тонко сфокусированного электронного или лазерного луча, может расплавиться и даже испариться, мгновенно образуя глубокий (корневой) канал, и до того, как значительное количество тепла попадет в основную часть заготовки, сварка будет завершена.

Таким образом, преимущества увеличения удельной мощности источника тепла заключаются в более глубоком проплавлении при образовании сварного шва, более высоких скоростях сварки и лучшем качестве сварки с меньшим повреждением заготовки.

2.2.2. Основные металлургические процессы, протекающие при сварке плавлением

При сварке плавлением материал расплавляется по краю соединяемых кромок, перемешивается и затвердевает, образуя после охлаждения сварной шов. Область расплава, образующегося в результате расплавления и перемешивания основного и электродного (или присадочного) металлов, называется сварочной ванной.

В случае электродуговой сварки расплавленный металл электрода может переноситься в сварочную ванну следующими способами.

При капельном переносе (рис. 2.20) отдельные капли металла, диаметр которых близок к диаметру электрода, перемещаются по дуговому промежутку под действием силы тяжести. На рисунке 2.20, *a* показан капельный перенос стали в процессе электродуговой сварки плавящимся стальным электродом в защитной газовой смеси $\text{Ar} - 2\% \text{O}_2$. Такой перенос часто приводит к разбрызгиванию материала.

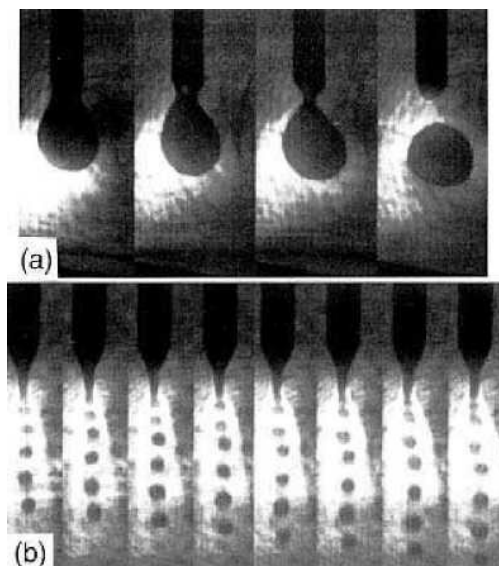


Рис. 2.20. Перенос металла при электродуговой сварке плавящимся стальным электродом в защитной атмосфере (защитных газах $\text{Ar} - 2\% \text{O}_2$):
a – капельный перенос при силе тока 180 А и напряжении 29 В;
b – струйный перенос при силе тока 320 А и напряжении 29 В

При увеличении значения сварочного тока выше критического капли металла проходят через дуговой промежуток под действием электромагнитной силы с более высокой частотой и скоростью, образуя струю расплавленного металла (рис. 2.20, *b*). Такой перенос металла гораздо более стабилен и не приводит к образованию брызг. Значение критического тока зависит от материала и размера электрода, а также от состава защитного газа (в данном случае, он лежит между 180 и 320 А).

Возможен еще вариант переноса материала в процессе короткого замыкания. При касании электродом поверхности сварочной ванны расплавленный металл с разогретого конца электрода переносится в ванну. Этот вид переноса характерен для малых диапазонов сварочных токов и диаметров электродов и приводит к образованию небольшой быстро затвердевающей области расплава, которая эффективна для сварки тонких профилей и при некоторых положениях сварки (например, потолочном).

Основные химические реакции при сварке плавлением включают реакции газ – металл и шлак – металл. Состав сварного шва определяется металлургическими процессами, протекающими на свариваемых кромках, и в объеме капель электродного металла и сварочной ванны в результате контакта с газовой и шлаковой фазами.

При электродуговой сварке взаимодействие расплавленного металла с газовой фазой определяется составом атмосферы дуги и химическими свойствами элементов, содержащихся в расплаве. Атмосфера дуги может содержать кислород, азот, водород, CO, CO₂, пары воды, металла и шлака.

Азот, кислород и водород обычно поступают из воздуха (защитных газов, флюсов) либо обрабатываемой заготовки (влаги или грязь на ее поверхности) и расходных материалов (присадочной проволоки, покрытий электродов) и значительно влияют на качество сварного шва. CO₂ и CO образуются при разложении в дуге компонентов покрытий электродов и флюсов.

Химические реакции газ – металл протекают на границе между газовой фазой и жидким металлом. Основные реакции включают растворение газообразного азота, кислорода и водорода в жидком металле, образование химических соединений (оксидов, нитридов, гидридов) и выделение монооксида углерода.

При высокой температуре дуги основная часть газов диссоциирует и переходит в атомарное состояние. При этом их химическая активность и способность к растворению в расплавленном металле повышаются.

Взаимодействие расплавленного металла с газовой фазой может приводить к следующим отрицательным последствиям:

- «выгоранию» легкоокисляющихся элементов – снижению их содержания в сварочной ванне по сравнению с содержанием в сварочной проволоке;
- снижению прочностных и пластических свойств при наличии в шве оксидов, нитридов и водорода;
- образованию пор в шве вследствие задержки выхода пузырьков газов (N₂, H₂, CO) в процессе кристаллизации сварочной ванны.

Для предотвращения отрицательного влияния газов используют различные способы защиты дуги и сварочной ванны (покрытие электродов, флюсы, защитные газы, вакуум); предварительную очистку свариваемых поверхностей, прокаливание сварочных материалов и сушку защитных газов; введение в состав сварочных материалов элементов-раскислителей, способных связать попавший в сварочную ванну кислород в нерастворимые оксиды; а также использование сварочных материалов с повышенным содержанием легкоокисляющихся элементов с учетом их выгорания при сварке.

Шлаки образуются в результате расплавления покрытий электродов или флюсов. Они состоят из смеси оксидов, фторидов, хлоридов элементов и чистых металлов.

Взаимодействие расплавленного металла сварочной и шлаковой ванны определяется составом шлака и условиями перераспределения растворимых соединений между контактирующими жидкими фазами.

Кислород, взаимодействуя с расплавом, окисляет элемент, составляющий его основу. В случае стали окисляется железо, и образуются его оксиды.

Оксид FeO растворяется в металле шва и окисляет примеси или легирующие элементы, обладающие большим химическим сродством к кислороду: Si, Mn, Ti, Cr, C. Оксиды этих элементов не растворимы в железе, и их основное количество переходит в шлак.

Затвердевание (кристаллизация) сварного шва начинается от границ оплавленного основного металла. Образующиеся кристаллы стремятся расти в направлении максимального отвода тепла (перпендикулярно границе ванны к центру шва). В процессе перемещения сварочной головки кристаллиты изгибаются и вытягиваются в направлении сварки.

Зона кристаллизации за границами сварочной ванны (рис. 2.21, справа) состоит из твердых кристаллов (дендритов) и междендритной жидкости. Частично расплавленный материал вокруг передней части границы ванны (слева) также содержит твердые и частично расплавленные зерна и межзеренную жидкость. Таким образом, сварочную ванну окружает область твердо-жидкой смеси.

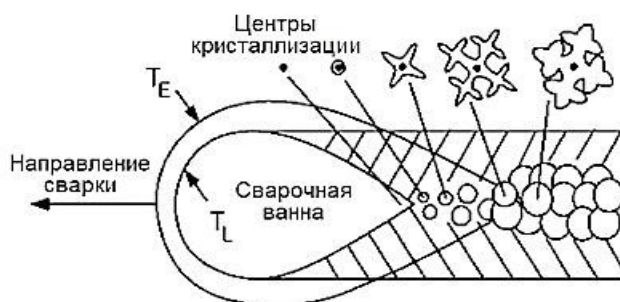


Рис. 2.21. Схема формирования микроструктуры у границ сварочной ванны

2.2.3. Формирование соединения при сварке давлением

При сварке давлением образование соединения осуществляется, главным образом, за счет совместной пластической деформации материалов в зоне их контакта. Нагрев используется в качестве дополнительного активирующего фактора и в ряде процессов отсутствует.

Реальные поверхности всегда покрыты пленками оксидов, адсорбированных молекул воды, газов и жировых веществ (рис. 2.22). Кроме того, даже полированные поверхности имеют микронеровности высотой до 100 нм. Поэтому при контакте таких поверхностей невозможно обеспечить их полное соприкосновение (и химическое взаимодействие).

В процессе приложения давления при сближении свариваемых поверхностей происходит разрушение поверхностных оксидных и адсорбированных пленок, их удаление из области контакта в результате пластического течения металла, а между очищаемыми при совместной пластической деформации поверхностями протекают диффузионные процессы и образуются металлические связи, приводя к формированию неразъемного соединения.

Начальное соприкосновение реальных поверхностей происходит в отдельных точках, расположенных на гребнях микронеровностей. Контакт между поверхностями носит дискретный характер. Его суммарная площадь, зависящая от физико-химических свойств и микрорельефа поверхностей, составляет около 0,01–1 % от теоретической площади контакта. При такой площади реального контакта возникшие единичные металлические связи (очаги схватывания) не могут обеспечить высокой прочности соединения.

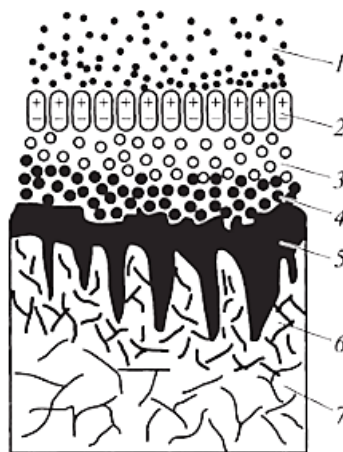


Рис. 2.22. Поверхность металла на воздухе:

- 1 – ионизированные частицы пыли; 2 – слой молекул жира; 3 – слой молекул воды;
 4 – адсорбированный слой ионов кислорода и нейтральных молекул воздуха;
 5 – оксидный слой; 6 – поверхностный слой кристаллитов с прослойками оксидов;
 7 – основной металл

При дальнейшем приложении давления микровыступы на поверхности деформируются путем пластического течения, что приводит к развитию процессов схватывания. При всех способах сварки давлением эта стадия реализуется за счет пластической деформации микровыступов контактирующих поверхностей (обеих при сварке однородных заготовок или менее прочной при сварке разнородных заготовок). При этом выступы микронеровностей сминаются, и происходит сближение соединяемых поверхностей на расстояния, соизмеримые с межатомными расстояниями в кристаллической решетке.

Для получения прочного и надежного сварного соединения необходимо расширение зоны соединения как по площади, так и по глубине, которое достигается за счет осуществления взаимной диффузии через границу контакта. На этой стадии формируется прочный сварной шов.

Сопутствующий нагрев до температуры пластического состояния либо плавления облегчает развитие диффузионного взаимодействия, приводя к увеличению активности и подвижности частиц кристаллической решетки. При этом происходит перестройка поверхностных слоев контактирующих тел. При значительном различии физико-химических свойств свариваемых материалов в зоне соединения возможна перестройка химических связей и изменение состава, параметров и типа кристаллической решетки.

Если сварка давлением осуществляется без внешнего нагрева (например, холодная сварка), стадия диффузионного взаимодействия не получает существенного развития, и соединение завершается на стадии деформационного схватывания.

Свариваемость материалов оценивают степенью соответствия заданных свойств сварного соединения одноименным свойствам основного металла, а также их склонностью к образованию таких сварочных дефектов, как трещины, поры, шлаковые включения и др. По этим признакам материалы делят на хорошо, удовлетворительно и плохо свариваемые.

При сварке однородных металлов и сплавов в месте соединения, как правило, образуется структура, идентичная или близкая к структуре соединяемых заготовок. В этом случае наблюдается хорошая свариваемость материалов.

При сварке разнородных материалов, взаимодействующих друг с другом, в зависимости от их свойств в месте соединения может образовываться либо твердый раствор на основе одного из материалов, либо химическое соединение с решеткой, отличающейся от решеток исходных материалов. Соответственно, свойства образующихся твердых растворов и, особенно, химических соединений могут значительно отличаться от свойств свариваемых материалов. Такие материалы считают удовлетворительно сваривающимися.

Если в сварном соединении образуются хрупкие и твердые структурные составляющие (например, интерметаллиды), то в условиях действия сварочных напряжений возможно возникновение трещин в шве или близлежащей зоне. В таком случае материалы относятся к категории плохо сваривающихся.

Разнородные материалы, не взаимодействующие друг с другом, относят к числу практически несваривающихся.

Кроме свойств материалов, свариваемость зависит от технологии сварки, схемы и способа соединения, а также – от эксплуатационных свойств сварной конструкции. Если технические требования к сварной конструкции удовлетворяются, то свариваемость считается достаточной. Если не обеспечивается хотя бы одно из требуемых свойств, то свариваемость недостаточна.

Механические характеристики сварного шва (прочность и твердость) обычно ниже по сравнению с основным металлом. Это связано с тем, что для предотвращения образования трещин при сварке плавлением, как правило, применяют присадочный материал, содержащий меньше легирующих элементов, чем металл заготовок. Пониженная пластичность шва может быть обусловлена также крупнокристаллической литой макроструктурой и повышенным содержанием газов.

В зоне термического влияния (ЗТВ) под воздействием нагрева происходят фазовые и структурные превращения, которые могут приводить к существенному увеличению твердости и снижению пластичности.

Одним из основных показателей свариваемости материалов является их склонность к образованию трещин при сварке. Наиболее опасным проявлением пониженной свариваемости является образование горячих (формирующихся в процессе кристаллизации, особенно при высоком содержании примесей) и холодных (образующихся в процессе фазовых и структурных превращений в твердом состоянии, в том числе в результате полиморфных превращений после сварки, насыщения газами и развития сварочных напряжений и деформаций) трещин в шве и в ЗТВ.

Свариваемость металла определяется и его склонностью к образованию пористости (рис. 2.23). Поры – это газовые включения в объеме твердого тела. Пористость зависит от концентрации газов в сварочной ванне, их растворимости в твердом или жидком металле при температурах кристаллизации, скорости кристаллизации металла, коэффициента диффузии газа в твердом и жидком металлах.

Выделение газа из расплавленного металла может происходить, если его растворимость уменьшается по мере понижения температуры металла.

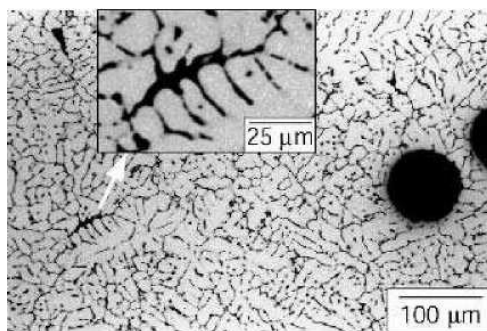
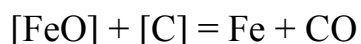


Рис. 2.23. Пористость в алюминиевой сварной заготовке: крупные сферические поры (темные) и междендритные газовые поры (участок увеличен)

Например, образование оксида углерода CO в результате реакции:



сопровождается выделением пузырьков CO, которые не растворяются в железе.

Улучшение исходной чистоты металла и степени его защиты при сварке, зачистка поверхности деталей, применение раскислителей, связывающих кислород, позволяют исключить образование пористости в сварном шве.

Механические свойства сварного шва зависят от его микроструктуры. Формирование столбчатых кристаллов вдоль центральной линии шва приводит к значительному снижению пластичности. Формирование мелких равноосных зерен в зоне соединения снижает склонность металла шва к растрескиванию при затвердевании во время сварки. Кроме того, мелкозернистая структура позволяет повысить механические свойства сварного шва, такие как пластичность и вязкость разрушения.

В качестве эффективных способов измельчения зерна в сварочном шве могут использоваться известные приемы измельчения структуры, используемые в технологиях литья, например, добавление модифицирующих добавок (создающих дополнительные центры кристаллизации) (рис. 2.24), а также методы динамического измельчения зерна, такие как перемешивание сварочной ванны (например, электромагнитное с помощью приложения переменного магнитного поля), колебания и пульсации дуги при сварке плавлением, приводящие к снижению ее температуры и способствующие гетерогенной (несамопроизвольной) кристаллизации на готовых центрах кристаллизации.

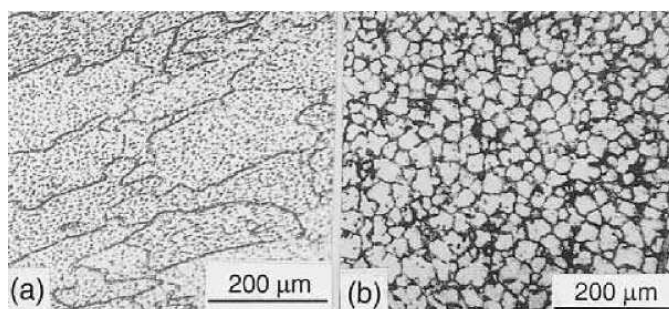


Рис. 2.24. Измельчение зерна при электродуговой сварке сплава 2090 Al-Li-Cu с использованием наполнителя 2319 Al-Cu, модифицированного 0,38 % Ti

2.2.4. Классификация видов сварки

Согласно ГОСТ 19521-74 сварку классифицируют по физическим, техническим и технологическим признакам.

По физическим признакам выделяют три класса сварки: термический, термомеханический, механический.

К термическому классу относятся виды сварки, осуществляемые плавлением с использованием тепловой энергии (дуговая, плазменная, электрошлаковая, электронно-лучевая, лазерная, газовая и др.).

К термомеханическому классу относятся виды сварки, осуществляемые с использованием тепловой и механической энергии (давления) (контактная, точечная электросварка, диффузионная и др.).

К механическому классу относятся виды сварки, осуществляемые с использованием механической энергии (ультразвуковая, взрывом, трением, холодная и др.).

При повышении температуры в месте соединения амплитуда колебания атомов относительно их равновесного состояния увеличивается, облегчая тем самым условия формирования соединения. При сварке плавлением детали соединяют за счет локального расплавления металла свариваемых заготовок без приложения давления. Расплавляется либо только основной металл (изделия) по кромкам, либо основной и дополнительный металл – электродный или присадочный.

С другой стороны, при сжатии соединяемых металлических частей под большим давлением возможно формирование общего электронного облака, взаимодействующего с ионами металлов обеих поверхностей, приводящего к образованию сварного соединения. Сварку давлением можно проводить без предварительного нагрева места соединения (холодная, взрывом, ультразвуковая, трением), когда вводится только механическая энергия, или с предварительным нагревом (контактная, диффузионная, газопрессовая), когда наряду с механической вводится тепловая энергия от внешних или внутренних источников теплоты. Причем, чем выше температура нагрева, тем меньшее давление требуется для сварки.

К *техническим признакам* относят способ защиты металла в зоне сварки, непрерывность процесса, степень механизации.

По способу защиты зоны сварки от окружающего воздуха различают сварку без специальных методов защиты («голым» электродом; электродом с тонким стабилизирующим покрытием, содержащим элементы, облегчающие процесс ионизации сварочной дуги); со шлаковой защитой (электродами с толстым покрытием, под флюсом, электрошлаковая); со шлакогазовой защитой (электродами с толстым покрытием); с газовой защитой (в среде газов); с комбинированной защитой (газовая среда и покрытие либо флюс).

По степени механизации сварку делят на ручную, механизированную (полуавтоматическую), автоматическую.

При дуговой сварке отнесение к тому или иному способу зависит от того, как выполняются зажигание и поддержание определенной длины дуги, манипуляции электродом для придания шву нужной формы, перемещение электрода по линии наложения шва и прекращение процесса сварки.

При ручной сварке указанные операции, необходимые для образования шва, выполняются сварщиком вручную.

При полуавтоматической сварке плавящимся электродом подача электродной проволоки в сварочную зону механизирована, остальные операции осуществляются вручную.

При автоматической сварке операции по возбуждению дуги, поддержанию ее длины и перемещению дуги по линии наложения шва механизированы.

Технологические признаки установлены для каждого вида сварки отдельно. Например, к технологическим признакам дуговой сварки относят: вид электрода, тип дуги, род и полярность тока и т. д.

Под режимом сварки понимают совокупность параметров (электрических, механических, временных и др.), обеспечиваемых сварочным оборудованием для получения качественного соединения. Качество соединения зависит также от техники сварки, формы электродов, качества сборки и подготовки поверхности, сварочного оборудования, системы контроля и от других конструктивно-технологических факторов.

Ниже представлена наиболее распространенная и общепринятая англоязычная аббревиатура основных методов сварки:

- MMA (Manual Metal Arc) или MMAW (Manual Metal Arc Welding) – ручная дуговая сварка штучными металлическими плавящимися электродами с покрытием;

- TIG (Tungsten Inert Gas) – дуговая сварка неплавящимся электродом в среде инертного защитного газа; чаще используется в случае ручной сварки;

- GTAW (Gas Tungsten Arc Welding) – сварка неплавящимся вольфрамовым электродом в среде инертного газа;

- GMAW (Gas Metal Arc Welding) – сварка металлическим электродом в газовой среде;

- SMAW (Shielded Metal Arc Welding) – автоматическая дуговая сварка металлическим электродом под слоем флюса;

- TIG–DG (Direct Current TIG) – сварка TIG на постоянном токе;

- TIG–AG (Alternating Current TIG) – сварка TIG на переменном токе;

- MIG (Metal Inert Gas) или MIGW (Metal Inert Gas Welding) – дуговая сварка плавящимся электродом в среде инертного газа с автоматической подачей присадочной проволоки;

- MAG (Metal Active Gas) – дуговая сварка плавящимся электродом (проволокой) в среде активного газа с автоматической подачей присадочной проволоки;

- PAW (Plasma Arc Welding) – плазменно-дуговая сварка;

- FCAW (Flux Core Arc Welding) – дуговая сварка плавящейся порошковой проволокой;

- SAW (Submerged Arc Welding) – электродуговая сварка под флюсом;

- ESW (Electroslag Welding) – электрошлаковая сварка;

- OAW (Oxyacetylene Welding) – газовая ацетиленокислородная сварка;

- LBW (Laser Beam Welding) – лазерная сварка;

- EBW (Electron Beam Welding) – электронно-лучевая сварка;

- HWW (High Frequency Welding) или RFW – высокочастотная сварка [27].

2.2.5. Типы соединений и положения сварки

На рисунке 2.25 показаны основные схемы сварных соединений при сварке плавлением: стыковое, угловое, тавровое, нахлесточное и торцевое.

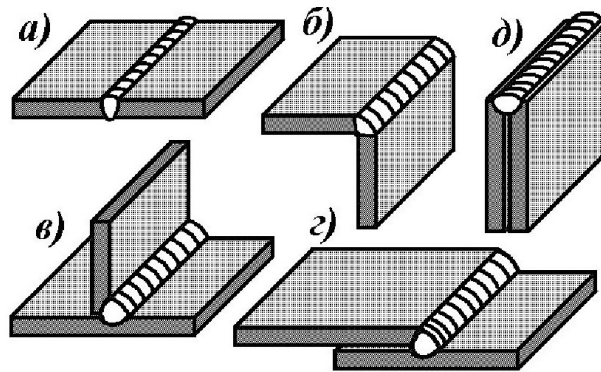


Рис. 2.25. Конструктивные типы сварных соединений:
а – стыковое; б – угловое; в – тавровое; г – нахлесточное; д – торцевое

Стыковое соединение без разделки кромок рекомендуется для толщин заготовок s не более 3 мм. Для толщин 3–21 мм рекомендуется V-образная разделка кромок. Наличие зазора обеспечивает полное проплавление.

Нахлесточное соединение применяется при $s = 2–6$ мм. Однако оно требует большего расхода металла и увеличения массы конструкции.

Тавровое соединение рекомендуется для толщины не более 5–6 мм. В случае больших толщин на вертикальной стенке снимаются двусторонние фаски.

При применении нахлесточного, таврового и углового соединений, характеризующихся повышенной жесткостью, вероятность образования трещин при сварке выше.

Получить качественный и надежный сварочный шов невозможно без правильного расположения электрода относительно металлической поверхности. При этом расположение электрода во многом определяется свариваемой конструкцией. Выбор пространственного положения сварки определяется формой и размерами конструкции, способом сварки и сложностью выполнения сварочных работ. В свою очередь, пространственное положение определяет параметры и особенности сварочного процесса.

На рис. 2.26 показаны варианты положения сварки (нижнее, вертикальное, горизонтальное и потолочное) и их обозначения.

При нижнем положении сварки электрод удерживается вертикально (либо под некоторым углом) по отношению к поверхности свариваемого металла. На схемах нижнее положение указывается в виде строчной буквы «Н». Это наиболее удобное положение (расплавленный металл не стекает под силой тяжести, поэтому нет необходимости уменьшать силу тока или изменять характер и скорость перемещения электрода во время сварки). Нижнее положение применяется для сварки толстых металлических заготовок. Сварной шов характеризуется максимальной прочностью на разрыв.

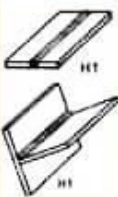
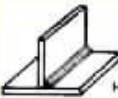
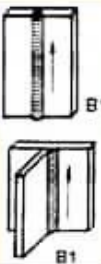
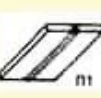
Вид детали	Н1 Нижнее	Н2 Нижнее тавровых соединений	Г Горизонтальное	В1 Вертикальное (на подъем)	В2 Вертикальное (на спуск)	П1 Потолочное	П2 Потолочное тавровых соединений	Н45 Переменное при наклонном расположении
Л Лист								-
Т Труба		-				-	-	
Л+Т Лист + труба			-			-		

Рис. 2.26. Пространственные положения сварных соединений

При сварке в горизонтальном положении электрод подводится перпендикулярно относительно сварочного шва. Сварку в таком положении осуществлять сложнее. Основная проблема заключается в вытекании жидкого металла из зоны сварки. Для предотвращения вытекания важно правильно подготовить свариваемые заготовки (подрезать кромки).

При вертикальном положении сварки сварной шов накладывается на вертикально расположенные заготовки. Чтобы жидкий металл не слишком быстро стекал вниз, электрод держат под определенным углом и варят либо снизу вверх (предпочтительнее), либо сверху вниз, однако в последнем случае прочность сварного соединения ниже.

Самым трудным считается потолочное положение сварки, при котором заготовки располагаются горизонтально, а электрод – вертикально по отношению к ним. В этом случае очень сложно удерживать каплю и обеспечивать высокое качество сварного шва.

2.2.6. Общие рекомендации по проектированию сварных конструкций

При проектировании сварных изделий и конструкций учитывают как необходимость обеспечения требуемых эксплуатационных характеристик, так и их технологичность.

Сначала определяют принципиальную возможность получения сварной заготовки. Затем устанавливают последовательность сборочно-сварочных операций и оценивают ожидаемые сварочные деформации (коробление), точность размеров и конфигурацию сварного изделия после механической обработки.

Способ сварки выбирают с учетом конструкторско-технологических признаков изделия, технико-экономических показателей процесса сварки и программы выпуска сварных конструкций. Одновременно с выбором вида сварки обычно назначают тип сварного соединения.

После этого в заготовках выделяют свариваемые элементы так, чтобы эти элементы (исходные заготовки) могли быть получены из профилей или технологичных отливок и поковок.

При выборе способа сварки учитывают возможности методов и удобство предполагаемой области сварки для осуществления выбранного способа сварки, доступности сварочного инструмента и присадочного материала.

В случае если исходная заготовка – профиль, проектирование свариваемых элементов сводится к выбору его оптимальных размеров и определению разделки кромок в соответствии с выбранным типом сварного шва.

При необходимости на исходных заготовках предусматривают сборочные и фиксирующие элементы, а также припуски на механическую обработку после сварки.

Ввиду значительного влияния формы сварного соединения и режимов сварки на прочность изделия, конструирование заготовки должно вестись одновременно с проработкой технологии ее изготовления.

2.3. Характеристика основных методов сварки

2.3.1. Электродуговая сварка

Электродуговая сварка относится к числу наиболее распространенных, дешевых и доступных видов сварки. *Этот вид сварки относят к сварке плавлением.* При электродуговой сварке основная часть теплоты, необходимая для нагрева и соединения свариваемых заготовок, обеспечивается дуговым разрядом (мощным стабильным разрядом электричества в ионизированной атмосфере газов и паров металлов). При этом образуется сварочная ванна, при затвердевании которой образуется сварное соединение.

Дуговую сварку классифицируют:

- 1) по виду электрода (плавящийся и неплавящийся);
- 2) по типу дуги (прямого, косвенного и комбинированного действия, трехфазная, сжатая);
- 3) по способу защиты сварочной ванны (под флюсом, в защитных газах);
- 4) по виду электрического тока (постоянный ток прямой и обратной полярности, переменный ток промышленной и повышенной частоты).

Электродуговую сварку выполняют плавящимся и неплавящимся электродом. В качестве плавящегося электрода применяют металлический стержень необходимого химического состава. Дуга горит между основным (свариваемым) металлом и металлическим стержнем, подаваемым в зону сварки по мере плавления. Сварной шов образуется из частично расплавленного основного металла и металла электрода. При использовании неплавящегося (угольного или вольфрамового) электрода сварной шов образуется за счет расплавления основ-

ного металла или основного и присадочного металла, вводимого в зону дуги (присадочный металл используется для введения в сварочную ванну в дополнение к основному металлу).

Сварку можно осуществлять одним или несколькими электродами. Если два электрода подсоединены к одному полюсу источника питания дуги, то такой процесс называют двухэлектродной сваркой, а если подсоединенных электродов больше – многоэлектродной сваркой пучком электродов. Если каждый из электродов получает независимое питание, сварку называют двухдуговой (многодуговой).

По типу дуги различают сварку дугой прямого действия (зависимой дугой) и дугой косвенного действия (независимой дугой). Дугой прямого действия называют дугу, формирующуюся между электродом и свариваемым металлом (рис. 2.27, *а*). Дуга косвенного действия горит между двумя электродами (рис. 2.27, *б*), основной металл не является частью сварочной цепи и расплавляется преимущественно за счет теплопередачи от столба дуги. Дугой комбинированного действия называют дугу, горящую между двумя электродами и свариваемым металлом (рис. 2.27, *в*). При комбинированной дуге возможно подключение по трехфазной схеме, тогда сварочную дугу называют трехфазной.

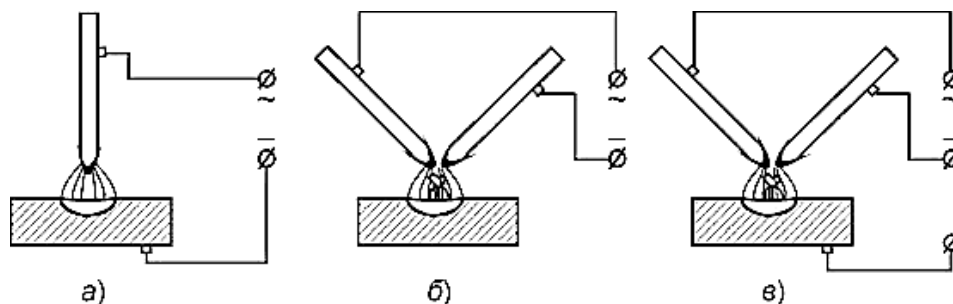


Рис. 2.27. Различные варианты сварочной дуги:

а – прямого действия; *б* – косвенного действия; *в* – комбинированного действия

По роду сварочного тока различают сварку с использованием дуги постоянного тока прямой или обратной полярности либо переменного тока промышленной или повышенной частоты.

При низкой температуре газ не проводит электрический ток. Ионизация дугового промежутка происходит во время зажигания дуги при высокой температуре под действием электрического поля и непрерывно поддерживается при ее горении.

В дуге происходит взаимная бомбардировка катода положительными ионами и анода электронами, в результате чего кинетическая энергия частиц переходит в тепловую, что приводит к нагреву и расплавлению электрода и основного металла (заготовки). На поверхности катода и анода различают, соответственно, катодные и анодные пятна, представляющие собой наиболее нагретые участки, через которые проходит электрический ток.

Строение дуги прямого действия с использованием постоянного тока прямой полярности (минус на электроде) схематически показано на рис. 2.28.

Сварочная дуга имеет три зоны: катодную 3, граничащую с катодным пятном 2 электрода 1, анодную 5, граничащую с анодным пятном 6 свариваемого металла 8, и столб дуги 4. Температура столба дуги для разных методов сварки колеблется в пределах от 6 000 до 15 000 К.

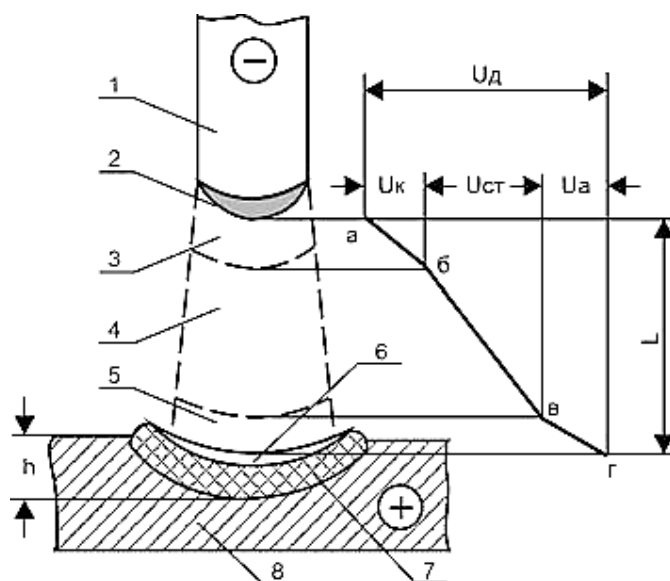


Рис. 2.28. Схема строения сварочной дуги:

1 – электрод; 2 – катодное пятно; 3 – катодная область; 4 – столб дуги; 5 – анодная область; 6 – анодное пятно; 7 – сварочная ванна; 8 – основной металл (деталь);
абвг – кривая падения напряжения в дуге; U_k – падение напряжения в катодной области;
 $U_{ст}$ – в столбе дуги; U_a – анодной области; U_d – напряжение дуги; L – длина дуги;
 h – глубина проплавления (провар)

Наибольшая температура достигается в середине столба дуги (порядка 6 000–7 000 °С). С увеличением плотности тока температура возрастает. На катодном пятне стального электрода температура может достигать 2 400 °С, а на катоде угольного электрода – 3 200 °С, соответственно, на аноде стального – 2 600 °С и на аноде угольного электрода – около 4 000 °С.

Разность температур на аноде и катоде используется при сварке плавящимся электродом. Детали из тонкого или легкоплавкого металла, а также из чувствительных к перегреву высокоуглеродистых, нержавеющей и легированных сталей сваривают током обратной полярности, т. е. деталь является катодом, а электрод – анодом.

Сварка плавящимся электродом с использованием дуги прямого действия и постоянного или переменного тока получила наибольшее распространение для ремонта.

Сварку неплавящимся электродом с использованием дуги прямого и реже косвенного действия сравнительно часто применяют при ремонте и изготовлении кузовов автомобилей, при сварке тонколистового металла.

Сварку неплавящимся электродом (угольным или вольфрамовым) ведут, как правило, постоянным током при прямой полярности, т. е. электрод имеет отрицательный заряд, чтобы избежать перегрева.

2.3.2. Ручная дуговая сварка покрытыми электродами

При ручной дуговой сварке электрод после зажигания дуги перемещают вдоль кромок свариваемых изделий вручную. Схема процесса представлена на рисунке 2.29.

Плавящийся покрытый электрод состоит из металлического стержня с нанесенным на его поверхность слоем специального покрытия (обмазки).

Держатель электрода представляет собой металлический зажим с электрически изолированной внешней оболочкой, к которому крепится электрод и который сварщик может безопасно удерживать. Сердечник покрытого электрода проводит электрический ток к дуге и обеспечивает присадочный металл для соединения. Длина металлического стального стержня в зависимости от его диаметра может составлять 250–450 мм. Для обеспечения электрического контакта верхняя часть электрода (около 1,5 см), удерживаемая держателем, оголена (не имеет покрытия). Держатель электродов подключается с помощью кабеля к одному выводу источника питания, а свариваемая заготовка – к другому (рис. 2.29, а).

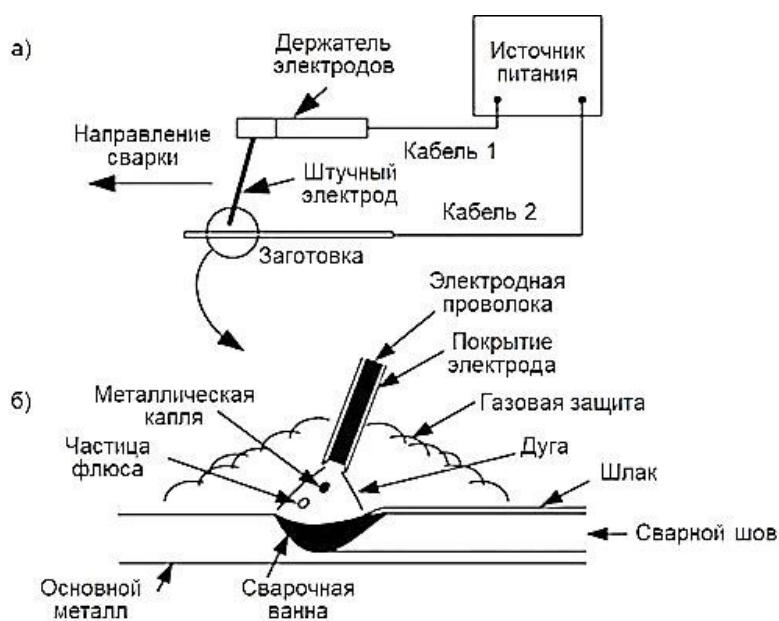


Рис. 2.29. Схема (а) и процесс (б) ручной дуговой сварки

Дуга горит между металлическим стержнем электрода и основным металлом (свариваемой заготовкой), который в данном случае является частью сварочной цепи. Для сварки используется теплота, выделяемая в столбе дуги и на электродах.

Процесс зажигания дуги включает в себя короткое замыкание электрода на заготовку, отвод электрода на расстояние 3–6 мм и возникновение устойчивого дугового разряда.

Короткое замыкание выполняется для разогрева торца электрода и заготовки в зоне контакта с электродом. После отвода электрода с его разогретого торца (ка-

тогда) под действием электрического поля начинается термоэлектронная эмиссия (испускание) электронов. Столкновение быстро движущихся по направлению к аноду (заготовке) электронов с молекулами газов и паров металла приводит к их ионизации. В результате дуговой промежуток становится электропроводным, и через него происходит разряд электричества. Процесс зажигания дуги заканчивается возникновением устойчивого дугового разряда в столбе дуги.

Под действием теплоты электрод и основной металл локально плавятся. Капли жидкого металла с расплавляемого электродного стержня переносятся в металлическую сварочную ванну через дуговой промежуток. Покрытие электрода при плавлении образует вокруг дуги газовую защиту и жидкую шлаковую ванну, формирующуюся на поверхности расплавленного металла за счет меньшей плотности. Металлическая и шлаковая ванны вместе образуют сварочную ванну. По мере движения дуги металл сварочной ванны затвердевает, и образуется сварочный шов. Жидкий шлак, остывая, образует на поверхности шва твердую шлаковую корку, которая защищает от окисления застывший, но еще горячий металл сварного шва, и удаляется после остывания шва. Шлак замедляет охлаждение металла и способствует уплотнению шва.

На рис. 2.29 стрелкой показано направление сварки.

Свойства электрода определяются составом электродного стержня и покрытия. Химический состав электродной проволоки (стержня электрода) выбирают в соответствии с составом и свойствами свариваемого металла (ГОСТ 2246-70).

Различают электроды с тонкими и толстыми покрытиями. Тонкие покрытия для ручной электродуговой сварки являются стабилизирующими и содержат легко ионизирующиеся добавки, повышающие устойчивость горения дуги и способствующие более плавному протеканию электрического тока. Средние и толстые покрытия, кроме функции стабилизации дуги, обеспечивают также защиту и легирование металла. Они содержат шлакообразующие (защищают металл от контакта с воздухом и удаляют примеси из жидкого металла); газообразующие (при горении образуют газ, который защищает дугу и расплавленный металл от доступа воздуха); раскисляющие (связывают кислород и удаляют его из сварного шва); легирующие (растворяются в металле шва и обеспечивают его заданный состав) и связующие компоненты (связывают и закрепляют все компоненты покрытия на поверхности электрода). Покрытие может содержать также металлические порошки для увеличения скорости формирования сварного шва.

В качестве источников питания при ручной дуговой сварке штучными плавящимися электродами с покрытием могут применяться трансформаторы, выпрямители, генераторы, инверторы. Трансформаторы предназначены для сварки на переменном токе; выпрямители, генераторы и инверторы – для сварки на постоянном токе.

Источники переменного тока более распространены, так как сварочные трансформаторы проще и надежнее в эксплуатации, долговечнее, у них выше КПД. Однако при питании переменным током промышленной частоты (50 Гц) происходит синусоидальное изменение напряжения и тока; ток в секунду 100 раз меняет свое направление, дуга периодически гаснет и зажигается, и при недоста-

точной ионизации между электродами может прерваться. При использовании постоянного тока устойчивость горения дуги значительно выше, улучшаются условия сварки в различных пространственных положениях, появляется возможность использовать прямую либо обратную полярность, регулируя тем самым степень нагрева электрода и заготовки.

Основным параметром режима ручной дуговой сварки является сварочный ток, который выбирают в зависимости от диаметра и типа металлического электрода. В свою очередь, диаметр электродов выбирают, исходя из толщины свариваемой заготовки.

При сварке на вертикальной плоскости ток уменьшают на 10–15 %, в потолочном положении на 15–20 % по сравнению с током для сварки в нижнем положении, а сварку выполняют электродами диаметром не более 4 мм.

Скорость сварки выбирается исходя из необходимости проплавления свариваемого сечения и заполнения разделки кромок наплавленным металлом.

К числу основных преимуществ ручной дуговой сварки по сравнению с другими методами следует отнести сравнительную простоту, портативность и невысокую стоимость оборудования, а также возможность проводить сварку в любом пространственном положении (нижнем, вертикальном, горизонтальном и потолочном). Поэтому данный способ часто используется для ремонта и при проведении строительно-монтажных работ.

Ручная дуговая сварка применяется, главным образом, при выполнении коротких, прерывистых и швов сложной конфигурации, располагающихся в труднодоступных местах, когда сложно или невыгодно применять автоматические методы сварки.

Однако защита зоны сварки только за счет состава покрытия электродов, как правило, недостаточна при сварке химически активных металлов, таких как алюминий и титан. Скорость сварки ограничена склонностью покрытий электродов к отслаиванию и перегреву при использовании высоких сварочных токов, а ограниченная длина электродов (как правило, около 35 см) требует замены электрода, что дополнительно снижает общую производительность. К недостаткам также следует отнести трудность сварки тонких (тоньше 1–2 мм) материалов и сильную зависимость качества сварки от квалификации сварщика.

2.3.3. Электродуговая сварка в защитных газах

При сварке в защитном газе электрод, зона дуги, сварочная ванна и зона термического влияния (ЗТВ) защищены струей защитного газа от контакта с воздухом (содержащимися в воздухе газами, O_2 , N_2 , H_2 , парами воды). Основную защиту обеспечивает истекающая из сопла сварочной головки газовая струя. При сложной конструкции деталей местную защиту осуществить трудно, поэтому сварку ведут в защитной камере.

Сварку можно выполнять неплавящимся и плавящимся электродами. В качестве неплавящегося, как правило, используют прутки вольфрама, а в качестве плавящегося – проволоку из основного металла или близкого к нему по химическому составу.

По сравнению с ручной дуговой, сварка в защитном газе имеет следующие преимущества:

- 1) облегчение процесса сварки;
- 2) возможность механизации и роботизации процесса;
- 3) более высокая производительность процесса (в 1,5–3 раза выше);
- 4) более широкая номенклатура свариваемых металлов;
- 5) более высокое качество сварных соединений.

В качестве защитных могут быть использованы химически инертные газы (Ar – аргон, He – гелий, они не образуют с другими элементами химических соединений и не растворимы в большинстве металлов), активные газы (CO₂ – углекислый газ, N₂ – азот и др.), а также газовые смеси.

Аргон легче ионизируется, чем гелий, поэтому зажигание дуги проще, а падение напряжения на дуге ниже. Кроме того, поскольку аргон примерно в 10 раз тяжелее гелия, он обеспечивает более эффективную защиту и большую устойчивость к выдуванию, чем гелий, а его расход меньше. Это, вместе с более активным рафинированием от оксидов и более низкой стоимостью аргона, делает его более привлекательным для использования в качестве защитного газа при сварке, чем гелий.

Аргон высшего сорта предназначен для сварки коррозионно-стойких сталей и химически активных металлов (титана, циркония, ниобия) и сплавов на их основе. Аргон рекомендуется также для сварки неплавящимся электродом сплавов алюминия, магния и других металлов.

С другой стороны, электропроводность гелия ниже. Поэтому электрическая дуга в атмосфере гелия дает более высокую температуру и глубину проплавления, обеспечивая возможность сварки более толстых заготовок и более высокие скорости сварки. С учетом меньшей плотности, гелий становится предпочтительнее аргона в случае потолочной сварки или необходимости дополнительной защиты швов с обратной стороны.

Для улучшения процесса сварки и качества сварного шва применяют также смеси защитных газов. Инертные газовые смеси состоят, как правило, из аргона и гелия и лучше защищают зону сварки от контакта с воздухом.

Сварка в активных газах сопровождается протеканием дополнительных химических реакций. Так, при сварке в углекислом газе при высоких температурах сварочной дуги CO₂ диссоциирует на оксид углерода CO и кислород O. Для нейтрализации окислительного действия кислорода используются раскислители (Si и Mn), которые имеют высокое сродство к кислороду и образуют на поверхности шва тонкую шлаковую пленку из оксидов. В отличие от аргонодуговой, сварку в углекислом газе выполняют только плавящимся электродом с повышенным содержанием марганца и кремния (например, Св-08ГС, Св-10Г2С и т. д.).

Сварка в смесях инертного и активного газа позволяет формировать более качественные швы с более глубоким проплавлением и меньшим разбрызгиванием металла, а также увеличивать скорость сварки.

Схема процесса сварки неплавящимся электродом в защитном газе представлена на рисунке 2.30. Сварочная головка с вольфрамовым электродом подклю-

ется к баллону с защитным газом, а также к одной клемме источника питания (рис. 2.30, а). Дуга горит между вольфрамовым электродом и заготовкой. Вольфрамовый электрод обычно находится в контакте с медной трубкой с водяным охлаждением, называемой контактной трубкой, как показано на рисунке 2.30, б, которая подсоединяется к сварочному кабелю (кабель 1) от клеммы. Это позволяет сварочному току от источника питания поступать на электрод, а электроду охлаждаться для предотвращения перегрева.

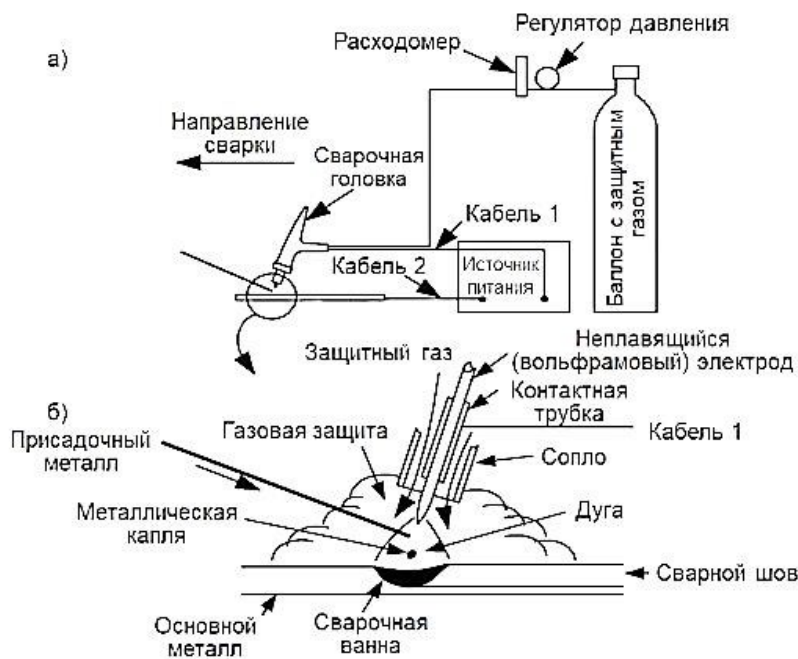


Рис. 2.30. Схема электродуговой сварки неплавящимся электродом в защитном газе:
а — общая схема; б — процесс сварки

Заготовка подключается кабелем к другой клемме источника питания (кабель 2). Защитный газ проходит через корпус головки и направляется через сопло к сварочной ванне, защищая ее от контакта с воздухом. При необходимости (например, для соединения более толстых заготовок) в зону сварки может добавляться присадочный материал (вручную или автоматически).

Область применения аргонодуговой сварки охватывает широкий круг материалов и изделий: узлы летательных аппаратов, элементы атомных установок, корпуса и трубопроводы химических аппаратов. Аргонодуговую сварку применяют для соединения цветных (алюминия, магния, меди) и тугоплавких (титана, ниобия, ванадия, циркония) металлов и их сплавов, а также легированных и высоколегированных сталей. Сварку выполняют в любом пространственном положении.

Сварку *неплавящимся* электродом чаще ведут на постоянном токе прямой полярности. При использовании дуги обратной полярности с поверхности свариваемого металла удаляются оксиды. Дугу на переменном токе обратной полярности с использованием неплавящегося электрода используют при сварке алюминия, магния и их сплавов.

Благодаря ограниченному подводу тепла сварка вольфрамовым электродом в среде защитного газа используется для соединения тонких заготовок. Контроль подачи присадочных материалов и подвода энергии к сварному шву может быть достигнут без изменения размера сварного шва. Метод можно также использовать для сварки стыковых соединений тонких листов только плавлением без добавления присадочных металлов. С учетом высокой степени защиты, процесс можно использовать для сварки химически активных металлов, таких как титан, цирконий, алюминий и магний.

Однако скорость формирования сварного шва низкая. Чрезмерные сварочные токи могут вызвать плавление вольфрамового электрода и привести к появлению хрупких вольфрамовых включений в металле шва. Используя предварительно нагретые присадочные металлы, скорость сварки можно повысить.

Для сварки листового металла толщиной 0,2–1,5 мм применяют автоматическую сварку неплавящимся электродом в импульсном режиме. В этом случае между электродом и заготовкой горит маломощная постоянная дежурная дуга, на которую накладываются мощные импульсные дуги.

2.3.4. Механизированная электродуговая сварка в защитном газе

При сварке этим способом используют плавящийся металлический электрод (электродную проволоку) без покрытия, а подача его в зону сварки механизирована (рис. 2.31).

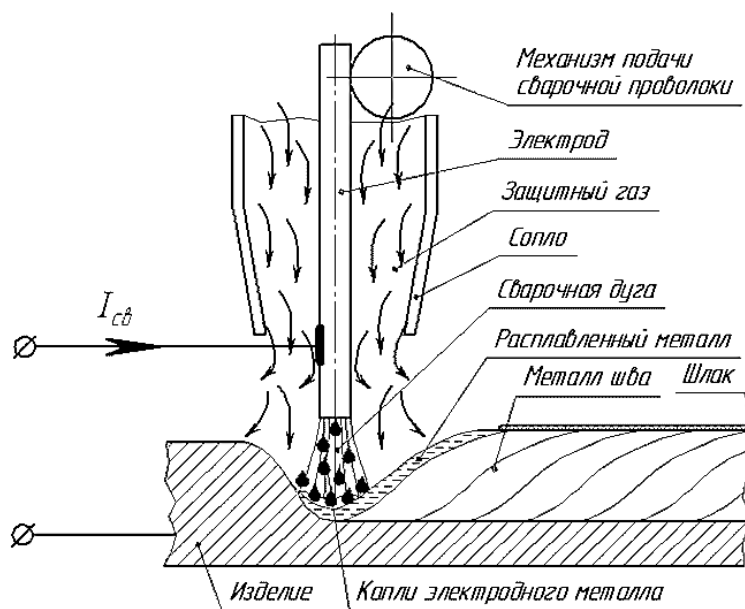


Рис. 2.31. Процесс механизированной сварки плавящимся электродом в среде защитного газа

Сваркой плавящимся электродом сваривают металл толщиной 3 мм и более. При этом необходимо применять высокие плотности тока (не менее 80–100 А/мм²), проволоку малого диаметра (0,6–3 мм) и большую скорость ее по-

дачи. Такой режим сварки обеспечивается только механизированной подачей проволоки в зону сварки.

Дуговую сварку в защитных газах часто применяют в робототехнических комплексах для сварки изделий в мелко- и среднесерийном производствах.

Сварку сталей часто выполняют в смеси $Ar + 5\% O_2$. Кислород уменьшает поверхностное натяжение расплавленного металла, что способствует снижению критической плотности тока, при которой капельный перенос металла переходит в струйный. Одновременно повышается устойчивость горения дуги при относительно небольших токах, что облегчает сварку металлов малой толщины.

В отличие от аргонодуговой, сварку в углекислом газе выполняют только плавящимся электродом. Как правило, используют повышенные плотности постоянного тока обратной полярности. При высоких температурах сварочной дуги CO_2 диссоциирует на оксид углерода CO и кислород O , окислительное действие которого нейтрализуется введением в проволоку раскислителей (Si и Mn), которые имеют высокое сродство к кислороду и образуют на поверхности шва тонкую шлаковую пленку из оксидов. Поэтому для сварки в атмосфере CO_2 углеродистых и низколегированных сталей применяют сварочную проволоку с повышенным содержанием марганца и кремния (например, Св-08ГС, Св-10Г2С и т. д.).

Диаметр электродной проволоки составляет 0,5–2 мм. Сварку выполняют при плотности тока не менее 80–100 А/мм². Несмотря на высокую плотность тока, струйный перенос расплавленного электродного металла, характерный для аргонодуговой сварки, не наблюдается. Поэтому процесс сварки в CO_2 характеризуется повышенным разбрызгиванием электродного металла (до 10–12 %).

Для уменьшения разбрызгивания применяют смеси газов, например, $CO_2 + (20–30)\% O_2$ или $Ar + (20–30)\% CO_2$.

Добавление O_2 или замена большей части CO_2 на Ar приводит к снижению поверхностной энергии и уменьшению капель электродного металла. Оптимальные составы смесей аргона с углекислым газом и кислородом позволяют осуществлять процесс сварки с небольшим разбрызгиванием и формировать швы повышенного качества с плавным переходом от металла шва к основному металлу.

Сваркой в углекислом газе обычно сваривают конструкции из углеродистых и низколегированных сталей (газо- и нефтепроводы, корпуса судов и т. п.). Преимуществами данного способа являются низкая стоимость углекислого газа и высокая производительность. Основным недостаток – разбрызгивание металла (на зачистку расходуется 30–40 % времени сварки). В ряде случаев сварка в смеси с кислородом может оказаться даже дешевле, чем сварка в CO_2 .

Для сварки в CO_2 часто используют порошковые проволоки, которые представляют собой металлическую трубчатую оболочку, заполненную шлакообразующими и газообразующими компонентами, раскислителями или легирующими элементами. Применение порошковых проволок улучшает защиту расплавленного металла, уменьшает разбрызгивание, делает более гладкой поверхность сварного шва.

Схема процесса сварки порошковой проволокой аналогична схеме, представленной на рис. 2.31, однако использование дополнительного защитного газа не является обязательным.

Разновидностью порошковых проволок являются самозащитные проволоки, оболочка которых изготовлена из легированной стали, а в наполнитель введены соединения редкоземельных металлов. Состав проволок обеспечивает устойчивость горения дуги и раскисление металла сварочной ванны. Самозащитная проволока используется при механизированной сварке в случаях, когда газовая защита шва из-за конструкции сварного соединения недостаточно надежна или невозможна.

2.3.5. Автоматическая электродуговая сварка под флюсом

Электродуговая сварка под флюсом – это сварка плавлением с использованием электрической дуги, которая горит между плавящимся проволочным электродом без покрытия и свариваемой заготовкой, при этом дуга защищена расплавленным шлаком и гранулированным флюсом, как показано на рис. 2.32 (слоем толщиной порядка 30–50 мм). Этот процесс относится к числу так называемых закрытых процессов (дугу невозможно наблюдать непосредственно).

Подача и перемещение электродной проволоки механизированы, а процессы зажигания дуги и заварки кратера в конце шва автоматизированы, что улучшает стабильность качества сварки и условия труда.

Для изоляции сварочной ванны от атмосферы воздуха, обеспечения устойчивого горения дуги, формирования поверхности шва и получения заданного состава и свойств наплавленного металла используют флюсы. Флюс подается из бункера (рис. 2.32, а), который перемещается вместе со сварочной головкой. При этом защитный газ не требуется, поскольку расплавленный металл отделен от воздуха расплавленным шлаком и гранулированным флюсом (рис. 2.32, б). По мере поступательного движения электрода металлическая и шлаковая ванны затвердевают с образованием сварного шва, покрытого твердой шлаковой коркой.

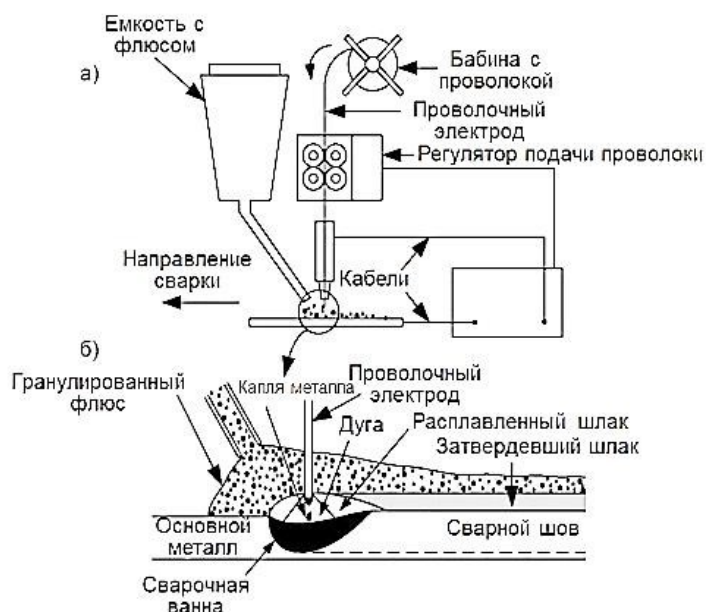


Рис. 2.32. Схема (а) и процесс (б) автоматической сварки под слоем флюса

Газы и пары, выделяющиеся при плавлении флюса и металла, образуют газовый пузырь, поднимая слой шлака над поверхностью сварочной ванны. Давление в пузыре уравнивает слой флюса и шлака. По мере накопления в пузыре газов давление возрастает, и оболочка пузыря разрывается, газы выходят наружу. Затем пузырь образуется вновь.

Сварку производят на автоматах, представляющих собой самоходную тележку (трактор), снабженную сварочной головкой, пультом управления и т. п.

Флюсы для сварки низкоуглеродистых и низколегированных сталей предназначены для раскисления шва и легирования его марганцем и кремнием. Их шлаки имеют высокое содержание SiO_2 и MnO . Флюсы изготовляют путем сплавления марганцевой руды, кремнезема, плавикового шпата в электропечах.

Флюсы для сварки легированных и высоколегированных сталей должны обеспечивать минимальное окисление легирующих элементов в шве. Для этого применяют плавленные и керамические низкремнистые, бескремнистые и фторидные флюсы. Их шлаки имеют высокое содержание CaO , CaF_2 и Al_2O_3 . Плавленные флюсы изготавливают из плавикового шпата, алюмосиликатов, алюминатов путем сплавления в электропечах.

Керамические флюсы готовят из порошкообразных компонентов путем замеса их на жидком стекле, гранулирования и последующего прокаливания. Основу керамических флюсов составляют мрамор, плавиковый шпат и хлориды щелочноземельных металлов.

Параметры режима автоматической сварки под флюсом:

- сварочный ток;
- напряжение дуги;
- скорость сварки;
- скорость подачи сварочной проволоки.

Для электродуговой сварки под флюсом чаще всего используется постоянный ток обратной полярности. Однако при очень высоких сварочных токах (например, выше 900 А) предпочтительнее использовать переменный ток, чтобы свести к минимуму задувание дуги.

Для сварки под флюсом характерно глубокое проплавление основного металла. Качество защиты при сварке под флюсом и производительность процесса выше, чем при ручной дуговой сварке, а себестоимость процесса ниже.

Защитное и очищающее действие шлака способствует получению чистых сварных швов при сварке под флюсом. Поскольку дуга находится под флюсом, брызги и потери тепла в окружающий воздух исключаются даже при высоких сварочных токах. В гранулированный флюс можно добавлять как легирующие элементы, так и металлические порошки для контроля состава металла сварного шва и увеличения скорости сварки, соответственно. Использование двух или более электродов еще больше увеличивает скорость сварки.

Благодаря высокой скорости сваркой под флюсом можно сваривать заготовки намного толще, чем при сварке в защитных газах плавящимся и неплавящимся электродом. Однако относительно большие объемы расплавленного шлака и металлической ванны часто ограничивают возможные положения

сварки (плоские поверхности в нижнем положении и кольцевая сварка труб). Относительно высокий подвод тепла может снизить качество сварки и привести к деформации заготовок.

Автоматическую сварку под флюсом широко применяют при изготовлении котлов, резервуаров для хранения жидкостей и газов, мостовых балок, сварных автомобильных колес; производстве сварных труб и др.

2.3.6. Электрошлаковая сварка

Электрошлаковая сварка (ЭШС) – это процесс, при котором тепловая энергия, необходимая для образования сварного соединения, обеспечивается теплотой, выделяемой при протекании электрического тока в объеме шлаковой ванны (рис. 2.33).

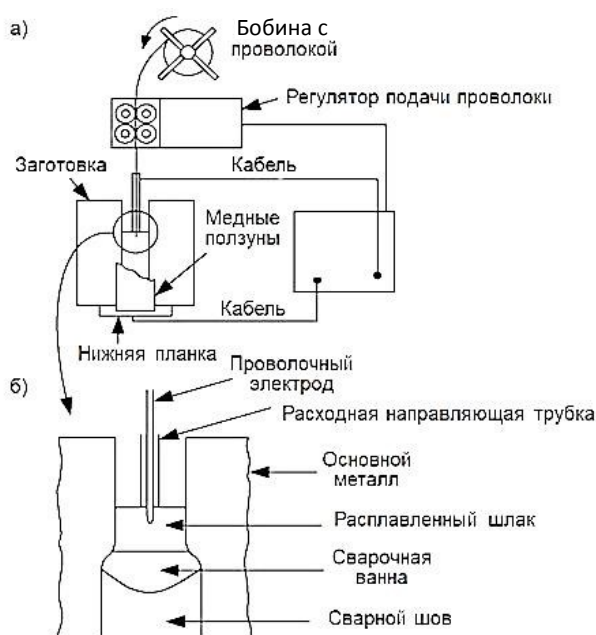


Рис. 2.33. Схема (а) и процесс (б) электрошлаковой сварки

Свариваемые заготовки устанавливают в вертикальном положении. В замкнутое пространство между водоохлаждаемыми медными ползунами и вертикально установленными кромками изделий засыпают флюс и подают электродную проволоку при помощи специального механизма подачи.

В начале процесса возбуждают дугу, флюс плавится, и образуется электропроводный шлак. Шлак шунтирует дугу, последняя гаснет, а выходная цепь источника питания замыкается через шлак. Резистивный нагрев, создаваемый электрическим током, проходящим через шлак, поддерживает последний в расплавленном состоянии, приводя к расплавлению кромок основного металла и электрода. Расплав стекает вниз и образует сварочную ванну, вытесняя шлак вверх. В результате сварочная ванна покрыта расплавленным шлаком, который защищает ее от контакта с воздухом и движется вверх по ходу сварки, постепенно затвердевая.

Чтобы сделать нагрев более равномерным, электроду часто придают колебательное движение, особенно при сварке более толстых участков. Заготовки толщиной до 150 мм можно сваривать одним электродом, совершающим поперечное колебание в плоскости стыка. При толщине заготовки более 150 мм используют несколько проволок.

В начальном и конечном участках сварного шва образуются дефекты: в начале шва – непровар кромок, в конце шва – усадочная раковина и неметаллические включения. Поэтому сварку начинают и заканчивают на специальных планках, которые затем удаляют газовой резкой.

Преимущества способа: возможна сварка металла любой толщины (начиная с 16 мм, есть опыт сварки металла толщиной до 2 м). Электрошлаковая сварка может иметь чрезвычайно высокую скорость формирования шва, но, независимо от толщины заготовки, требуется только один проход. В отличие от процессов дуговой сварки, при ЭШС отсутствуют угловые искажения, поскольку сварной шов симметричен относительно своей оси. Однако подвод тепла очень велик, а качество сварки может быть довольно низким и приводить к низкой ударной вязкости из-за крупнозернистой структуры в зоне соединения и в зоне термического влияния вследствие замедленного нагрева и охлаждения (для решения этой проблемы необходимо проведение термической обработки для измельчения зерна: нормализации или отжига). Кроме того, электрошлаковая сварка ограничивается вертикальным положением из-за большого размера ванн расплавленного металла и шлака.

Электрошлаковую сварку широко применяют в тяжелом машиностроении для изготовления ковано-сварных и лито-сварных конструкций (станины и детали мощных прессов и станков, коленчатые валы судовых дизелей, роторы и валы гидротурбин, котлы высокого давления и т. п.), для сварки несущих конструкций, мостов, рельсов и пр.

2.3.7. Контактная сварка

Контактная сварка относится к термомеханическим методам сварки. Она осуществляется с применением давления и нагрева места сварки проходящим через заготовки электрическим током. Различают следующие виды контактной сварки: стыковая, точечная, шовная, рельефная (рис. 2.34).

В случае стыковой сварки соединение заготовок происходит по всей плоскости их касания (по поверхности стыка торцов).

При точечной сварке кромки детали соединяются в одной или нескольких точках одновременно.

Шовная сварка – это соединение заготовок швом (перекрывающимися точками).

При рельефной сварке заготовки соединяются в одной или нескольких точках со специальными выступами-рельефами.

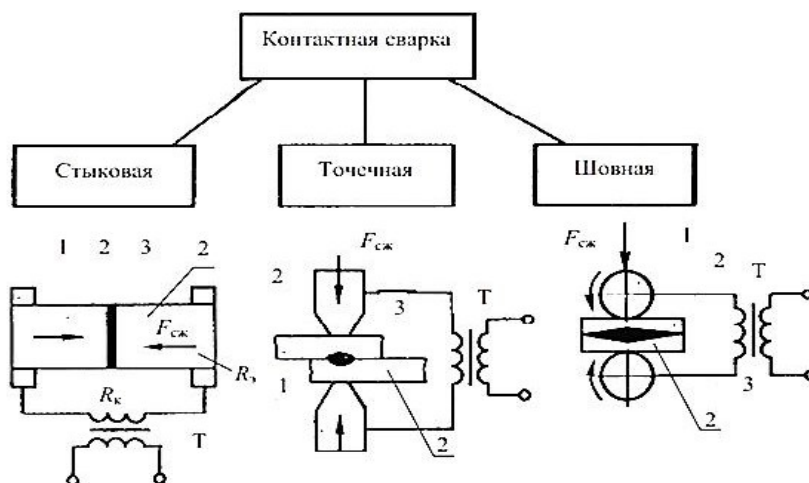


Рис. 2.34. Виды контактной сварки

Схема стыковой контактной сварки представлена на рис. 2.35. Свариваемые заготовки закрепляются в зажимах стыковой машины. Зажимы одновременно служат электродами и соединены гибкими шинами с трансформатором. Под действием силы P заготовки сжимаются, и по ним протекает сварочный ток.

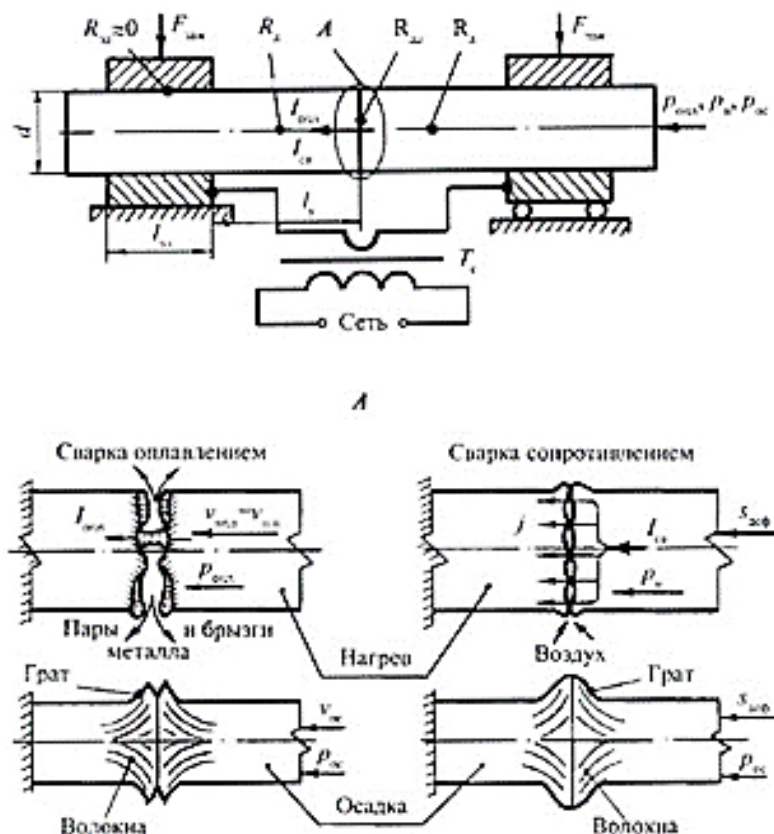


Рис. 2.35. Разновидности контактно-стыковой сварки

Сварочный ток нагревает заготовки, причем наибольшее количество тепла выделяется в месте контакта (отсюда название способа) между заготовками, так как сопротивление контакта R_k является наибольшим во вторичной цепи. Это

обусловлено неровностью поверхности стыка. Даже после тщательной обработки торцы заготовок соприкасаются только в отдельных точках. Кроме того, на поверхности свариваемого металла имеются оксидные пленки и загрязнения, которые также увеличивают сопротивление контакта.

Эффективный нагрев места сварки может быть получен при больших значениях сварочного тока. Сварочный ток при контактной сварке может достигать тысяч и даже десятков тысяч ампер.

По характеру формирования соединения различают стыковую *сварку сопротивлением* или *оплавлением*.

Стыковую сварку с разогревом стыка до пластического состояния называют *сваркой сопротивлением*, стыковую сварку с разогревом стыка до оплавления – *сваркой оплавлением*. Различие этих способов может быть проиллюстрировано с помощью графического изображения изменения силы тока I и давления P , в процессе сварки (циклограмм сварки).

При сварке *сопротивлением* поверхности соединяемых торцов подгоняют друг к другу посредством механической обработки, после чего сжимают и пропускают через них сварочный ток.

При протекании тока металл в месте стыка нагревается до пластичного состояния, после чего ток отключают (рис. 2.35), и производится осадка деталей. Под действием осевой силы происходит пластическая деформация, приводящая к выравниванию микронеровностей в месте стыка, разрушению поверхностных пленок и сближению поверхностных атомов, что обеспечивает возможность образования сварного соединения в твердом состоянии.

При сварке *сопротивлением* трудно обеспечить равномерный нагрев по всей поверхности стыка, поэтому способ применяют для соединения изделий небольшого сечения (до 200 мм²) с простым профилем (круг, квадрат, шестигранник).

При сварке *оплавлением* нагрев металла сопровождается оплавлением соединяемых торцов (рис. 2.35). Свариваемые заготовки сближают при включенном сварочном трансформаторе. Касание поверхностей происходит по отдельным выступам. Ввиду того, что площадь образовавшихся контактов небольшая, плотность тока, протекающего через эти контакты, велика, и происходит мгновенное оплавление металла с образованием жидких перемычек, которые под действием паров металла разрушаются. Часть металла в виде искр выбрасывается из стыка. Вместе с жидким металлом выбрасываются загрязнения, которые присутствуют на поверхности заготовок.

Продолжение сближения заготовок приводит к образованию новых перемычек и их оплавлению. Непрерывное образование и разрушение контактов-перемычек между торцами приводит к образованию на торцах слоя жидкого металла. После этого ток отключают и производят осадку с усилием $P_{ос}$. При осадке жидкий металл вместе с оксидами и загрязнениями выдавливается наружу и, застывая, образует *грат*, который обычно удаляют в горячем состоянии.

Различают прерывистую и непрерывную стыковую контактную сварку *оплавлением*. При непрерывной сварке заготовки на стадии оплавления сближаются с постоянной, но очень малой скоростью. При прерывистой сварке

происходит многократное замыкание и размыкание заготовки (подвижному зажиму придают возвратно-поступательное движение).

Сварка оплавлением имеет преимущества перед сваркой сопротивлением: торцы заготовок перед сваркой не требуют тщательной подготовки, можно сваривать заготовки с сечением сложной формы и большой площадью, а также разнородные металлы.

Сварку оплавлением рекомендуют для соединения деталей с повышенной площадью поперечного сечения, сплавов с высокой электро- и теплопроводностью. Типичными изделиями являются элементы трубчатых конструкций, колеса, рельсы, железобетонная арматура, трубы.

Точечную контактную сварку применяют преимущественно при соединении листовых заготовок. Перед сваркой контактные поверхности деталей зачищают металлической щеткой, пескоструйной обработкой или травлением и обезжиривают растворителями. Это необходимо для обеспечения стабильного процесса, который зависит от постоянства контактного сопротивления.

Свариваемые заготовки собирают внахлестку (рис. 2.36), сжимают между двумя медными электродами и пропускают электрический ток от сварочного трансформатора. Заготовки свариваются по ограниченному участку касания, называемым точками.

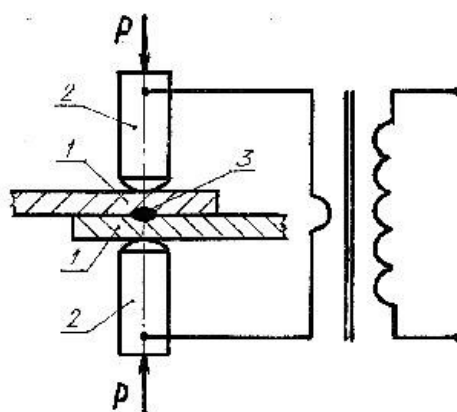


Рис. 2.36. Схема контактной точечной сварки:
1 – заготовка; 2 – электрод; 3 – сварная точка

Основными параметрами режимов сварки являются значения силы тока (I), давления ($P_{св}$) и характер их изменения. Последовательность включения и выключения сварочного тока и давления составляет цикл сварки.

Циклограмма процесса точечной контактной сварки аналогична циклограмме стыковой сварки сопротивлением. При кратковременном (0,01–0,5 с) протекании тока выделяется теплота в заготовках и электродах. В связи с тем, что наибольшим электрическим сопротивлением обладает контакт между заготовками и электродами, как правило, охлаждаются водой и отводят теплоту с поверхности заготовок, интенсивный нагрев металла происходит только в месте контакта. Здесь металл расплавляется, и появляется жидкое ядро. После образования жидкого ядра ток выключают и создают усилие осадки $P_{ос}$. Ядро затвердевает, образуя сварную точку.

Кристаллизация металла происходит при повышенном давлении электродов, что предотвращает образование в ядре точки дефектов усадочного характера – пор, трещин, рыхлого металла.

После выключения сварочного тока происходит кристаллизация ядра, завершающаяся образованием монолитного соединения обеих деталей в точке касания.

Для предотвращения разрушения локальной области соединения в процессе кристаллизации (затвердевания) упругими силами, давление с электродов не снимается сразу, а производится выдержка под давлением.

В конструкциях, где доступ к свариваемым деталям с двух сторон затруднен, применяется односторонняя точечная сварка.

Двух- или многоточечная сварка позволяет увеличить производительность сварки (до 50 000 точек в час и выше).

Контактная точечная сварка применяется для получения из листовых заготовок корпусных конструкций автомобилей, комбайнов, тракторов, приборов и т. д.

Для образования непрерывного сварного соединения (шва) используют *шовную* контактную сварку. При шовной сварке подвод тока от трансформатора, передачу усилия к деталям и их перемещение осуществляют вращающимися дисковыми электродами – роликами (рис. 2.37). Соединение заготовок осуществляется внахлестку в виде непрерывного или прерывистого сварного шва, формирующегося постановкой последовательного ряда перекрывающихся друг друга точек.

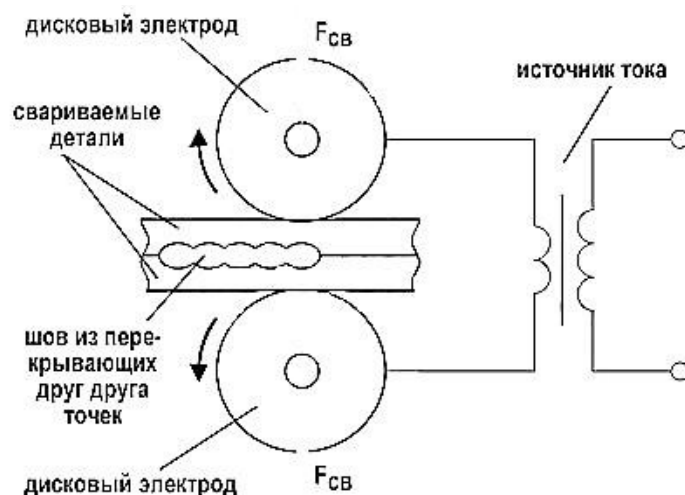


Рис. 2.37. Схема контактной шовной сварки

Шовную сварку применяют при изготовлении различных емкостей с толщиной стенок 0,3–3 мм, где требуются герметичные швы, – бензобаки, трубы, сильфоны, резервуары и др.

При сварке алюминиевых сплавов рекомендуется шаговая (прерывистая) сварка – в период подачи сварочного тока дисковые электроды (ролики) неподвижны относительно изделия, а перемещение изделия происходит путем периодического поворота электродов на небольшой угол в паузах между импульсами тока.

2.3.8. Холодная сварка

Холодная сварка относится к сварке давлением и, в отличие от контактной сварки, осуществляется без подведения электрического тока, но при значительно большей пластической деформации. Формирование сварного соединения происходит без нагрева свариваемых кромок внешними источниками тепла.

Сущность процесса заключается в том, что в процессе совместной пластической деформации свариваемых кромок разрушаются оксидные пленки, удаляемые из области контакта пластическим течением металла, а между очищаемыми поверхностями в результате протекания диффузионных процессов и образования металлических связей формируется неразъемное соединение.

Холодная сварка осуществляется при комнатной и даже пониженной температуре. Процесс осуществляют с помощью специальных устройств, вызывающих одновременную направленную деформацию предварительно очищенных поверхностей и нарастающее напряженное состояние, при котором образуется соединение.

Качество сварного соединения определяется состоянием контактных поверхностей, давлением (усилием сжатия) и степенью деформации при сварке. Оно также зависит от схемы деформации и способа приложения давления (статического, вибрационного). В зависимости от схемы пластической деформации заготовок сварка может быть точечной, шовной и стыковой.

При *холодной точечной* сварке (рис. 2.38) заготовки 1, с предварительно зачищенными и обезжиренными поверхностями в месте соединения, помещают внахлест между пуансонами 2 и 3, имеющими рабочие выступы, высота которых составляет 0,7–0,8 толщины свариваемого металла. Затем к пуансонам прикладывают давление, обеспечивающее проникновение до упора рабочих выступов в свариваемые заготовки.

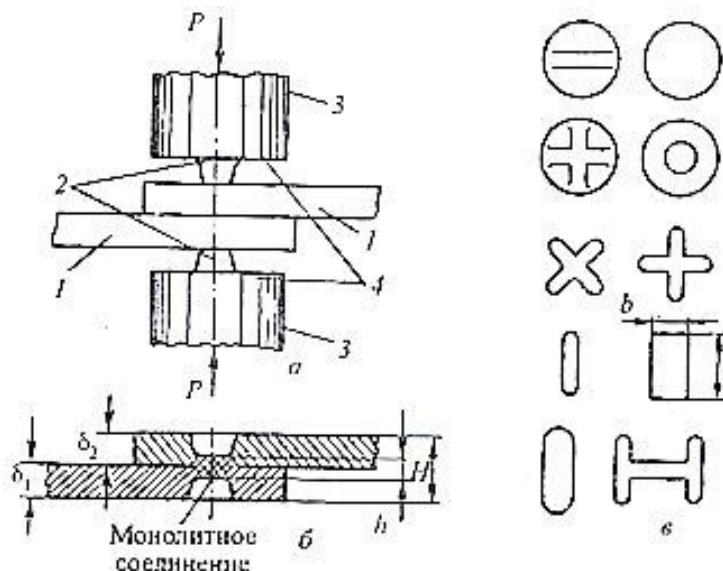


Рис. 2.38. Схема холодной точечной сварки (а), геометрия сварного соединения (б) и формы пуансонов (в)

Ввиду простоты способа, точечную холодную сварку успешно выполняют на серийных прессах с применением кондукторов, надежно фиксирующих свариваемые заготовки, чтобы исключить их коробление. Этот способ используют для соединения медных и алюминиевых заготовок в электротехнике, энергетике, цветной металлургии; соединяют медные контакты проводов, изготавливают кольца из меди и алюминия.

В случае *холодной шовной* сварки используют специальные ролики (рис. 2.39). Собранные заготовки *1* устанавливаются между роликами *2* и сжимаются ими до полного погружения рабочих выступов *3* в металл. Затем ролики приводятся во вращение. Перемещая изделие и последовательно внедряясь рабочими выступами в металл, они вызывают его интенсивную деформацию, в результате которой образуется непрерывное соединение – шов. Шовная сварка бывает двусторонняя, односторонняя и несимметричная. Двусторонняя сварка выполняется одинаковыми роликами. При односторонней сварке один ролик имеет выступ, высота которого равна сумме выступов при двусторонней сварке, а второй является опорным, без рабочего выступа. При несимметричной сварке ролики имеют различные по размерам, а иногда и по форме рабочие выступы.

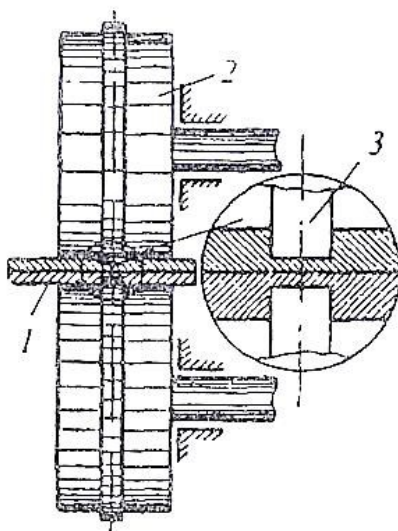


Рис. 2.39. Схема холодной шовной сварки:
1 – детали; *2* – ролики; *3* – выступы

Односторонняя роликовая сварка чаще применяется для сварки разнородных металлов, сильно отличающихся твердостью. Рабочая часть ролика вдавливается в более твердый металл. Такая сварка при прочих равных условиях обеспечивает более прочные швы и при сварке однородных металлов.

При роликовой сварке металл свободно течет вдоль оси шва, что затрудняет создание достаточного напряженного состояния металла в зоне соединения. Поэтому для достижения провара требуется большая пластическая деформация (на 2–6 %), чем при точечной сварке. Для роликовой сварки успешно применяются металлорежущие станки, например, фрезерные; при сварке тонких пластичных металлов – ручные настольные станки.

Неразъемное соединение может быть получено и по всей поверхности стыка одновременным сжатием соединяемых кромок.

Процесс, при котором формируется сварной шов, образующий замкнутый контур сравнительно небольшой длины в виде кольца, прямоугольника и т. п., называется *холодной контурной* сваркой. В этом случае соединяемые заготовки помещают между пуансонами, центрированными с помощью корпуса, после чего при сжатии силой P получают герметичный шов одновременно по всей длине требуемого контура.

Холодная сварка применяется для соединения пластичных металлов (например, сплавов меди, алюминия, цинка, никеля, золота, серебра, свинца и кадмия) толщиной от 0,2 до 15 мм. Особенно эффективно использование холодной сварки при соединении разнородных металлов, чувствительных к нагреву либо образующих хрупкие соединения (интерметаллиды). Диапазон используемых давлений варьируется, как правило, от 150 до 1000 МПа.

К числу преимуществ холодной сварки относят низкую энергоемкость, незначительное изменение свойств металла в зоне сварного соединения; высокую производительность и возможность автоматизации.

Однако обязательным условием осуществления сварки является высокая пластичность свариваемых металлов при комнатной температуре (относительное удлинение δ должно составлять не менее 30 %). Кроме того, типичным недостатком сварных соединений, получаемых данным способом, является снижение несущей способности из-за глубоких вмятин, оставляемых пуансонами на поверхности металлов.

2.3.9. Газовая сварка

При газовой сварке нагрев и расплавление кромок осуществляется с помощью специальных горелок, в которых сжигают горючие газы (ацетилен C_2H_2 , пропан, метан, водород, природный газ, содержащий около 94 % CH_4 , сжиженный газ МАФ (метилацетилен-алленовая фракция) и др.) и пары горючих жидкостей (бензина, керосина).

При газовой сварке нагрев заготовки осуществляется более плавно, чем при дуговой сварке, поэтому газовую сварку применяют для сварки: металла малой толщины (0,2–5 мм); легкоплавких цветных металлов и сплавов; металлов и сплавов, требующих постепенного нагрева и охлаждения (инструментальные стали, латуни); для подварки дефектов в чугунных и бронзовых отливках.

Благодаря высокой температуре пламени (около 3 200 °С), наиболее широко используется кислородно-ацетиленовая сварка, схема которой представлена на рис. 2.40.

Из баллонов кислород и горючий газ отдельно поступают в сварочную горелку, которая предназначена для правильного смешения кислорода с горючим газом, подачи горючей смеси к месту сварки и создания концентрированного пламени требуемой мощности. Заготовки и присадочный материал в виде прутка или проволоки расплавляют высокотемпературным пламенем газовой горелки.

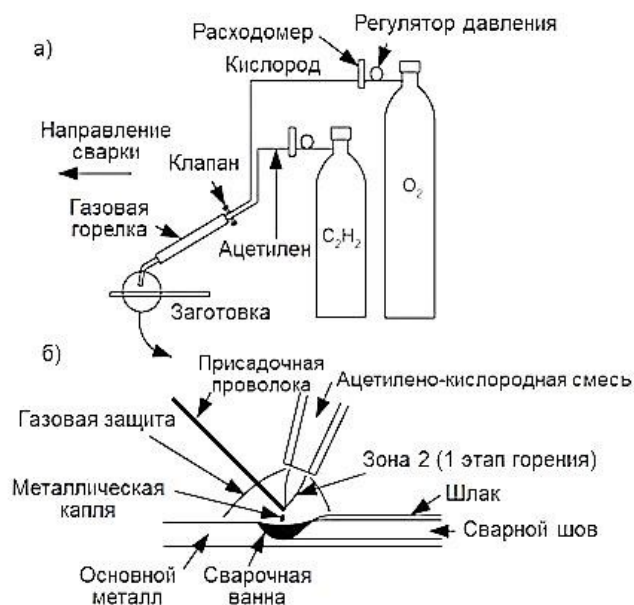


Рис. 2.40. Кислородно-ацетиленовая сварка:
а – общий процесс; *б* – процесс сварки

Общая химическая реакция горения ацетилена в кислороде может быть записана как $C_2H_2 + 2,5O_2 = 2CO_2 + H_2O^{пар} + Q$.

Сварочное пламя, образующееся при горении ацетилена, состоит из трех зон (рис. 2.41): ядра *1*, средней (восстановительной) зоны *2* и факела пламени (окислительной зоны) *3*.

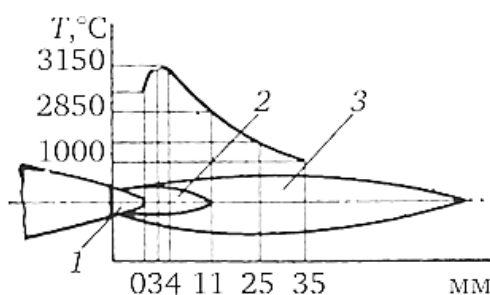


Рис. 2.41. Строение и температура сварочного пламени

В зоне *1* происходит нагрев до температуры воспламенения газовой смеси, поступающей из мундштука. Ядро пламени имеет вид усеченного конуса с округленным концом. Эта часть пламени состоит из смеси кислорода и раскаленных продуктов разложения ацетилена и кислорода (самая яркая часть пламени).

Горение ацетилена протекает в 2 этапа. В зоне *2* протекает первая стадия горения ацетилена. В горелку подают один объем ацетилена и один объем кислорода, в результате чего протекает реакция: $C_2H_2 + O_2 = 2CO + H_2$. Образующиеся в восстановительной зоне продукты горения ацетилена CO и H_2 нагревают и расплавляют металл. Они также могут восстанавливать оксиды, в том числе образующиеся при сварке оксиды железа. Зона *2* имеет самую высокую температуру, причем максимальная температура в этой зоне ($\approx 3\,150\,^{\circ}C$) дости-

гается на расстоянии 3–5 мм от конца ядра пламени. Эта зона имеет характерное синеватое свечение и называется сварочной или рабочей зоной.

В зоне 3 (факеле) протекает вторая стадия горения ацетилена за счет кислорода окружающего воздуха: $2\text{CO} + \text{H}_2 + 1,5\text{O}_2 = 2\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}^{\text{пар}}$. Эта часть пламени имеет желтоватую окраску с красным оттенком. Газообразные продукты этой зоны обладают окислительной способностью, однако они препятствуют контакту расплавленного металла с воздухом.

Строение, температура и влияние сварочного пламени на расплавленный металл зависят от соотношения кислорода и ацетилена в горючей смеси. В зависимости от расхода горючего газа пламя бывает нейтральным, окислительным и восстановительным (науглероживающим).

Нейтральное или *нормальное восстановительное* пламя формируется, когда кислород (O_2) и ацетилен (C_2H_2) смешиваются примерно в равных количествах ($\text{O}_2 : \text{C}_2\text{H}_2 = 1 : 1,2$) и сжигаются на конце сварочной горелки. Нейтральное пламя характеризуют короткий внутренний конус (область, где происходит первичное сгорание в результате химической реакции между O_2 и C_2H_2) и более длинная внешняя оболочка (2-ая стадия горения ацетилена). Для большинства металлов и сплавов используется нейтральное пламя.

Восстановительное пламя. При использовании избытка ацетилена ($\text{O}_2 / \text{C}_2\text{H}_2 < 1,1$) пламя становится восстановительным. Ацетилен сгорает не полностью. Ядро пламени при этом удлиняется по сравнению с ядром нормального пламени, пламя теряет резкие очертания. Такое пламя применяют при сварке чугуна, наплавке быстрорежущих сталей и твердых сплавов, а также некоторых цветных металлов и сплавов, например, алюминия, который легко окисляется. Способ также подходит для сварки высокоуглеродистых сталей (в данном случае пламя называется науглероживающим), потому что избыток кислорода может окислять углерод и приводить к образованию газовой (CO) пористости в сварном шве.

Окислительное пламя. При использовании избытка кислорода ($\text{O}_2 / \text{C}_2\text{H}_2 > 1,1\text{--}1,2$) пламя приобретает голубоватый оттенок и становится окислительным из-за наличия неизрасходованного кислорода. Размеры ядра пламени уменьшаются. Это пламя предпочтительнее при сварке латуни (избыточный кислород образует с цинком в латуни тугоплавкие оксиды, пленка которых покрывает сварочную ванну и, таким образом, предотвращает испарение цинка из нее).

Основным преимуществом процесса кислородно-ацетиленовой сварки является простота, портативность и низкая стоимость оборудования. Поэтому он удобен для технического обслуживания и ремонта. Однако из-за ограниченной удельной мощности скорость сварки очень низкая, а подвод тепла на единицу длины сварного шва довольно велик, что приводит к большим зонам термического влияния и сильным деформациям. При увеличении толщины металла снижается производительность и увеличивается деформация. Процесс кислородно-ацетиленовой сварки не рекомендуется для сварки таких реакционно-способных металлов, как титан и цирконий, из-за его ограниченной защитной способности.

2.3.10. Электронно-лучевая сварка

Электронно-лучевая сварка (ЭЛС) – это сварка, при которой нагрев и расплавление соединяемых деталей производят электронным лучом (направленным потоком электронов, излучаемых раскаленным катодом). Электронно-лучевую сварку осуществляют в вакуумных камерах.

Схема процесса представлена на рис. 2.42, а. Катод электронно-лучевой пушки представляет собой отрицательно заряженную нить накала. При нагревании до температуры термоэлектронной эмиссии эта нить испускает электроны, которые ускоряются электрическим полем, возникающим между отрицательно заряженным электродом смещения (расположенным немного ниже катода) и анодом. Проходя через отверстие в аноде, поток электронов фокусируется электромагнитной катушкой в локальную область (пятно) на поверхности заготовки. Типичные значения силы тока и ускоряющего напряжения, используемые при ЭЛС, варьируются в пределах 50–1000 мА и 30–175 кВ, соответственно. Электронный пучок может быть сфокусирован до диапазона диаметров 0,3–0,8 мм, а результирующая плотность мощности может достигать 10^{10} Вт/м².

Свариваемые детали, собранные без зазора, помещают в вакуумную камеру и подают на них электронный луч. При соударении с изделием электроны тормозятся, их кинетическая энергия переходит в тепловую энергию и расплавляет металл. Температура в месте соударения достигает 5 000–6 000 °С. Перемещая электронный луч вдоль стыка, получают сварной шов. Электронный пучок высокой интенсивности способен не только расплавить, но и испарить металл, обеспечив образование очень узкого с глубоким проплавлением сварного шва (рис. 2.42, б), что обеспечивает значительную экономию металла.

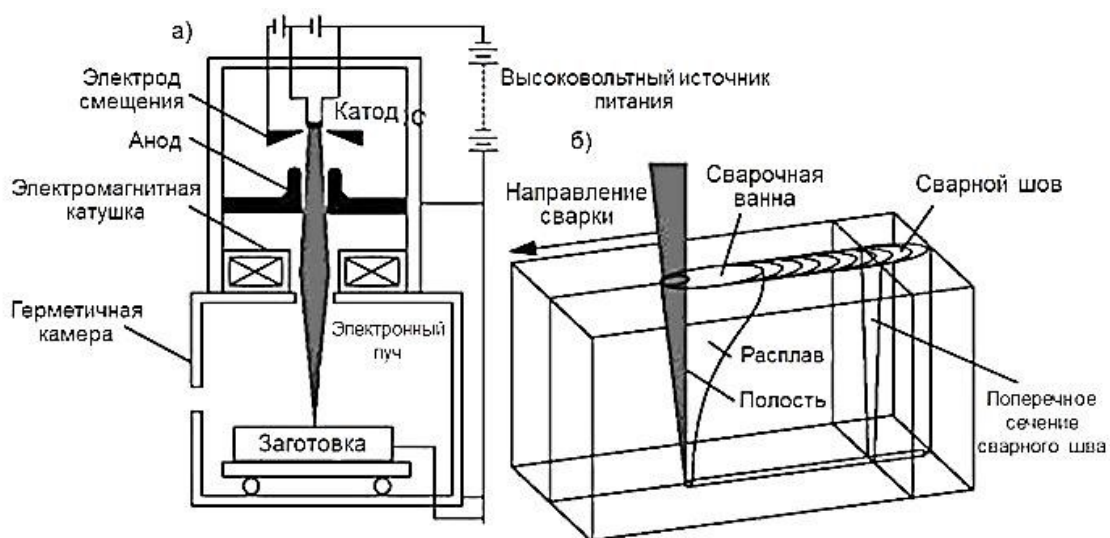


Рис. 2.42. Схема (а) и процесс (б) электронно-лучевой сварки

Электронный луч с высокой плотностью энергии обычно используется для сварки тугоплавких и теплопроводных металлов и деталей больших толщин (до 200 мм). При сварке же легкоплавких и легкоиспаряющихся металлов (напри-

мер, алюминия, магния) и деталей небольшой толщины целесообразнее применять луч с малой плотностью энергии, а иногда с импульсным нагревом, когда действие луча на изделие чередуется с паузами.

Основные параметры режима ЭЛС включают силу сварочного тока (мА), ускоряющее напряжение (кВ) и скорость сварки (см/сек).

Диаметр электронного луча уменьшается с уменьшением давления окружающей среды. Электроны рассеиваются при столкновении с молекулами воздуха. Поэтому, чем ниже давление окружающей среды, тем меньше они рассеиваются. Это является основной причиной проведения ЭЛС в вакуумной камере.

Сварка в вакууме обеспечивает получение зеркально чистой поверхности и дегазацию расплавленного металла. Благодаря очень высокой удельной мощности в электронно-лучевой сварке возможно полное проплавление даже в толстых заготовках. Соединения, требующие многопроходной дуговой сварки, могут быть сварены электронным лучом за один проход при высокой скорости сварки. При этом общий подвод тепла на единицу длины шва намного ниже, чем при дуговой сварке, что обеспечивает узкую зону термического влияния и малую деформацию заготовок. Химически активные и тугоплавкие металлы можно сваривать в вакууме, где нет воздуха, вызывающего загрязнение. Некоторые разнородные металлы также можно сваривать, поскольку высокая скорость охлаждения при ЭЛС может предотвратить образование крупнозернистых, хрупких интерметаллических соединений. При сварке деталей, сильно различающихся по массе и размеру, высокая точность фокусировки электронного луча, определяющая область сварки и позволяющая формировать зону сплавления необходимой геометрии, помогает предотвратить чрезмерное плавление меньшей детали.

Однако стоимость оборудования для ЭЛС очень высока. Создание вакуума в рабочей камере, загрузка и выгрузка изделий из нее требуют значительного времени, что не только снижает производительность процесса, но и затрудняет осуществление комплексной автоматизации всего процесса изготовления сварных изделий.

В результате торможения электронов в свариваемом металле, особенно при большом ускоряющем напряжении (>100 кВ), возникает жесткое рентгеновское излучение, что требует дополнительной биологической защиты обслуживающего персонала и, кроме того, усложняет и без того достаточно сложное оборудование для ЭЛС.

Необходимость создания высокого вакуума (10^{-3} – 10^{-6} торр) и защиты от рентгеновского излучения создает неудобства и занимает много времени. По этой причине для электронно-лучевой сварки были разработаны установки ЭЛС среднего вакуума (10^{-3} –25 торр) и безвакуумные (1 атм).

Малый диаметр электронного луча требует высокой точности при подготовке соединяемых поверхностей и выравнивания кромок с пистолетом. Кроме того, остаточные и разнородные магнитные свойства металлов могут вызвать отклонение луча и приводить к непровару.

Электронно-лучевую сварку не рекомендуется использовать при неполной дегазации материалов. При высоких скоростях сварки пузырьки газа, которые

не успевают покинуть глубокие сварочные ванны, приводят к пористости сварного шва. Материалы, содержащие компоненты с высоким давлением паров, например, сплавы магния и свинец-содержащие сплавы, также не рекомендуются сваривать этим методом, поскольку испарение этих элементов приводит к загрязнению насосов или вакуумной системы.

Электронно-лучевую сварку применяют для тугоплавких, химически активных металлов и их сплавов (вольфрамовых, танталовых, молибденовых, ниобиевых, циркониевых), а также алюминиевых и титановых сплавов и высоколегированных сталей. Металлы и сплавы можно сваривать в однородных и разнородных сочетаниях, со значительной разностью толщин, температур плавления. Минимальная толщина свариваемых заготовок составляет 0,02 мм, максимальная – до 100 мм.

2.3.11. Лазерная сварка

При лазерной сварке (в англоязычной аббревиатуре laser beam welding – LBW) нагрев и расплавление кромок соединяемых деталей производят лазерным лучом (направленным сфокусированным мощным световым лучом микрочастиц-фотонов). Лазерный луч представляет собой вынужденное монохроматическое излучение, длина волны которого зависит от природы рабочего тела лазера-излучателя. Оно возникает в результате вынужденных скачкообразных переходов возбужденных атомов рабочих тел на более низкие энергетические уровни.

Лазерный луч получают с помощью твердотельных либо газовых лазерных установок. В твердотельном лазере монокристалл легируют небольшим количеством переходных или редкоземельных элементов. Электроны легирующего элемента могут избирательно возбуждаться до более высоких энергетических уровней при воздействии мощных импульсных вспышек ламп накачки. Генерация лазерного излучения происходит, когда эти возбужденные электроны возвращаются в свое нормальное энергетическое состояние. Лавинный поток фотонов, движущихся в осевом направлении, фокусируют и направляют с помощью оптических систем для достижения высокой плотности мощности (более 10^9 Вт/см²). В таких условиях все известные материалы не только плавятся, но и испаряются.

В последние годы уровень мощности твердотельных лазеров значительно повысился, и мощность разработанных лазеров непрерывного действия на основе иттрий-алюминиевого граната (YAG), легированного неодимом, превышает 3–5 кВт.

В газовых лазерах активный газ или газовая смесь (например, газовая смесь CO₂, N₂ и He в CO₂-лазере) заключается в трубке, ограниченной с двух сторон строго параллельными зеркалами, как в твердотельных лазерах. Возбуждение газовых молекул осуществляется с помощью электрического разряда, возникающего между электродами, подключенными к источнику питания. В CO₂-лазерах может быть достигнута более высокая мощность, чем в твердотельных лазерах, например, 15 кВт. На рис. 2.43 показана схема лазерной сварки в режиме образования узкого сварного шва с глубоким проплавлением.

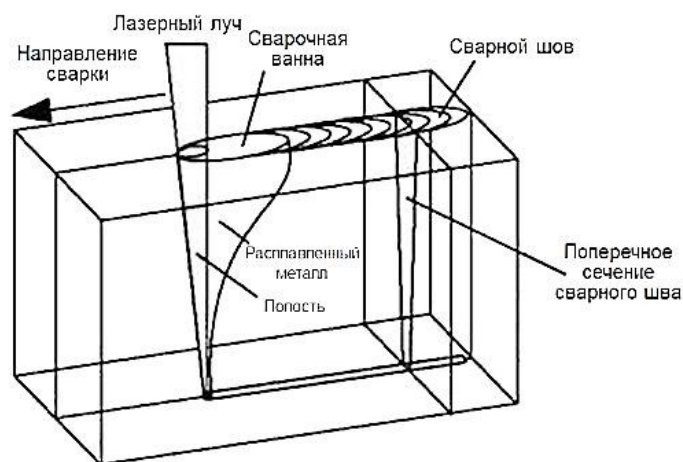


Рис. 2.43. Лазерная сварка

Газовые лазеры могут работать в непрерывном режиме и позволяют сваривать изделия значительной толщины при повышенной мощности излучения и коэффициенте полезного действия до 20 %. Имеются сведения о сварке сталей толщиной 50 мм и более при мощности непрерывного излучения в несколько десятков киловатт.

Помимо твердотельных и газовых лазеров, были разработаны полупроводниковые диодные лазеры мощностью 2,5 кВт и фокусным диаметром 1 мм. Несмотря на то, что узкая глубокая зона сварного соединения этим методом пока недостижима, сварка методом проводимости (поверхностное плавление) обеспечивает получение швов с полным проплавлением и отношением глубины к ширине 3:1 или выше при сварке листов толщиной 3 мм.

Основными параметрами режимов лазерной обработки являются мощность излучения, диаметр пятна фокусировки, скорость перемещения обрабатываемого материала относительно луча.

Механизмы процессов при лазерной и электронно-лучевой сварке схожи, но при лазерной сварке не обязательно использование вакуума. Однако лазерный луч может отражаться полированной металлической поверхностью, приводя к потере мощности. Для снижения отражательной способности используют модификацию поверхности, создание шероховатости, окисление и нанесение покрытия. При обработке в режиме глубокого проплавления с образованием канала поглощение становится высоким, потому что луч задерживается внутри отверстия за счет внутреннего отражения.

В процессе LBW, особенно при высоких уровнях мощности, следует избегать образования плазмы (ионизированного газа), которая может поглощать и рассеивать лазерный луч, и значительно уменьшать глубину проникновения. Поскольку энергия ионизации гелия (24,5 эВ) выше, чем у аргона (15,7 эВ), гелий с меньшей вероятностью ионизируется, чем аргон. Однако гелий легче воздуха и поэтому менее эффективно вытесняет воздух с пути луча. Было обнаружено, что использование смеси He с 10 % Ar улучшает проплавление по сравнению с чистым He при высокоскоростной сварке, когда легкому защитному газу может не хватить времени для вытеснения воздуха с пути луча.

Преимуществом лазерной сварки является быстрый локальный нагрев металла и высокая скорость охлаждения после прекращения воздействия луча. Это позволяет свести к минимуму зону термического влияния, сварочные напряжения и деформации и обеспечить высокие скорости сварки. При этом, в отличие от электронно-лучевой, при лазерной сварке не требуется создания вакуума и защиты от рентгеновского излучения. Метод может использоваться для сварки разнородных металлов или деталей, сильно различающихся по массе и размерам.

Однако очень высокая отражательная способность лазерного луча поверхностью металла является существенным недостатком. Из-за неспособности лазерного луча проникать в металл, теплопередача происходит только с поверхности. Поэтому попытки достичь глубокого проплавления за счет повышения тепловой энергии в пятне нагрева приводят к появлению дефектов сварного шва (рыхлость, бугристость, поры) вследствие вытеснения жидкого металла световым давлением и давлением паров испаряемого металла.

Кроме того, как и для ЭЛС, стоимость оборудования очень высока, и требуется точная подготовка кромок и выравнивание стыка.

Лазером сваривают преимущественно металлы толщиной до 1 мм, так как коэффициент полезного действия преобразования энергии в лазерное излучение довольно низкий.

Наибольшее применение лазерная сварка нашла в производстве изделий электронной, радиотехнической промышленности, в точном приборостроении, при получении микроминиатюрных элементов (приварка выводов к тонкопленочным схемам, микромодулям, полупроводниковым устройствам и др.).

2.3.12. Плазменная сварка

Под плазмой понимают полностью либо частично ионизированный газ, состоящий из заряженных электронов и ионов, а также нейтральных с электрической точки зрения молекул и атомов.

Плазменно-дуговая сварка (PAW) – это процесс дуговой сварки, при котором нагрев и расплавление/соединение кромок осуществляется плазменной струей. В отличие от обычной электрической, дуга плазмы представляет собой сжатую плазменную струю, обладающую большой энергией. В устройствах такого типа рабочий газ подается в разрядную камеру, внутри которой горит мощная дуга. За счет теплообмена с дугой газ нагревается, ионизируется и истекает через выходное отверстие камеры (сопло) в виде плазменной струи, используемой в качестве источника нагрева.

Температура плазменной струи, применяемой для сварки, составляет 10 000–20 000 °С. В качестве плазмообразующих газов применяют азот, аргон, водород, гелий, воздух и их смеси.

Применяют два основных плазменных источника нагрева: плазменную струю, выделенную из столба косвенной дуги, и плазменную дугу, в которой дуга прямого действия совмещена с плазменной струей.

Плазменная струя представляет собой независимый источник теплоты, позволяющий в широких пределах изменять степень нагрева и глубину про-

плавления поверхности заготовок. Тепловая мощность плазменной струи ограничена, и ее применяют для сварки и резки тонких металлических листов и неэлектропроводящих материалов.

За счет совмещения плазменной струи со столбом дуги при плазменной сварке обеспечивается высокий энергетический КПД (нагрев обрабатываемого металла осуществляется как за счет конвективного теплообмена с плазменной струей, так и за счет тепла дуги).

Плазменная дуга обладает большой тепловой мощностью и имеет более широкое применение, в том числе для сварки высоколегированной стали, сплавов титана, никеля, молибдена, вольфрама.

Зажигание дуги при плазменной сварке имеет свои особенности. В отличие от электродуговой сварки неплавящимся вольфрамовым электродом, в сварочном аппарате которого вольфрамовый электрод выступает из сопла защитного газа GTAW, при плазменной сварке вольфрамовый электрод утоплен в глубине отверстия газового сопла (PAW) (рисунок 2.44).

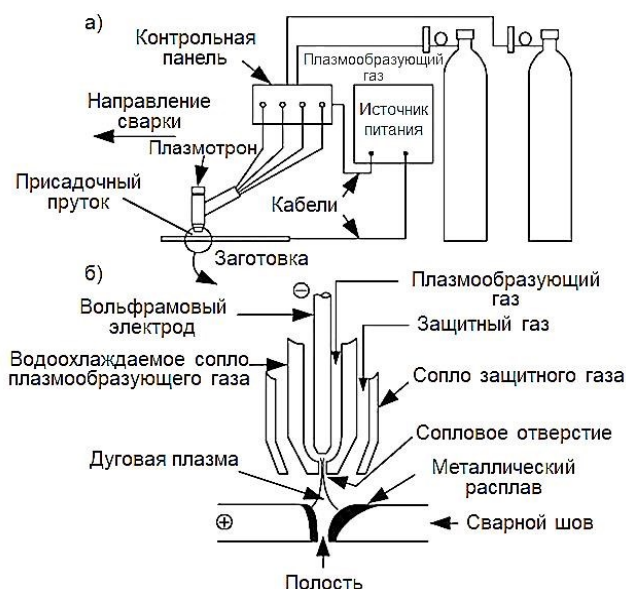


Рис. 2.44. Схема (а) и процесс (б) плазменной сварки

Поэтому зажигание дуги не может быть достигнуто постукиванием кончика электрода по заготовке. Пульт управления позволяет инициировать дежурную дугу между наконечником электрода и водоохлаждаемым газовым соплом с помощью высокочастотного генератора. Затем дуга постепенно передается из области между наконечником электрода и газовым соплом в область между наконечником электрода и заготовкой.

Плазменная сварка по многим параметрам более эффективна по сравнению с классической газовой и электрической сваркой. Использование плазмы обеспечивает более высокую температуру, повышенный КПД и, следовательно, более глубокое проплавление шва и более высокие скорости сварки, низкий расход инертных газов, а также малую площадь прогрева, что практически исключает деформацию и существенно понижает усадку шва.

Особенности геометрии плазменной дуги (рис. 2.45) позволяют проводить сварку труднодоступных мест, а также осуществлять сварку заготовок повышенной толщины за один проход там, где для аргонодуговой сварки требуется несколько проходов. С помощью плазмы можно сваривать не только металлические, но и неметаллические материалы.

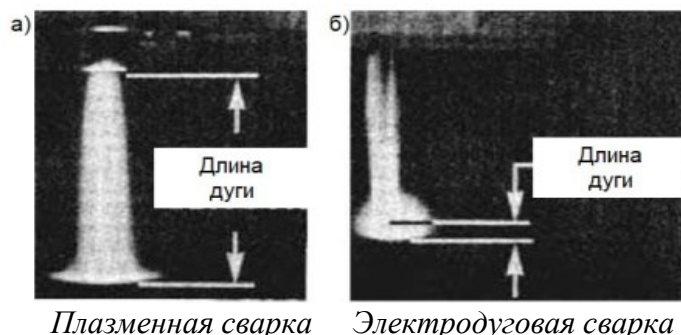


Рис. 2.45. Длина дуги:
а – при плазменной сварке; *б* – при электродуговой сварке
 неплавящимся вольфрамовым электродом в защитном газе

Плазменной дугой можно сваривать металл толщиной до 10 мм без разделки кромок и применения присадочного материала. Так как плазменная дуга обладает высокой стабильностью, то обеспечивается повышенное качество сварных швов. Это позволяет выполнять микроплазменную сварку металла толщиной 0,025–0,8 мм. Особенно эффективна микроплазменная сварка тонкостенных труб из меди и медных сплавов, когда сварное соединение образуется встык без разделки кромок. При этом плазмообразующим газом является аргон, а защитным – гелий.

Однако горелка PAW более сложна. Для осуществления процесса требуется правильная конфигурация и положение наконечника электрода, выбор оптимальной мощности и силы тока, правильного диаметра отверстия сопла для конкретного применения и оптимизация расхода газов. Для этого необходим пульт управления, и стоимость оборудования для PAW выше, чем для GTAW, особенно при использовании переменного тока. К недостаткам относится и недолговечность горелок.

Тем не менее, по некоторым оценкам, в настоящее время около 65 % работ, которые раньше выполнялись при помощи электросварки, выполняются с помощью плазмы. При помощи плазменного оборудования монтируют трубопроводы разного назначения, ее используют в машино- и самолетостроении, строительстве и ремонте.

2.3.13. Сварка взрывом

Сварка взрывом относится к классу сварки давлением, при котором соединение свариваемых заготовок осуществляется в результате совместной пластической деформации поверхностей заготовок за счет энергии направленного взрыва, выделяющейся при взрыве заряда взрывчатого вещества (ВВ). Существуют 2 основные схемы сварки взрывом: параллельная и угловая (рис. 2.46)

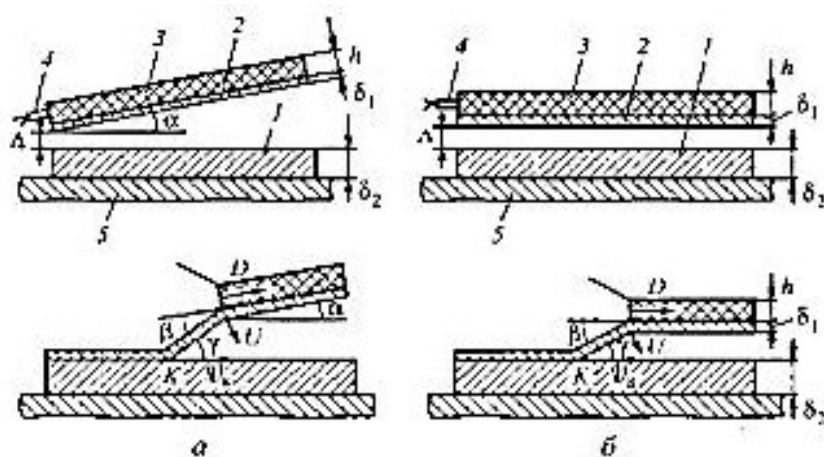


Рис. 2.46. Схемы проведения сварки взрывом:

а – расположение свариваемых пластин под углом друг к другу;

б – параллельное расположение пластин; 1 – неподвижная пластина; 2 – метаемая пластина;

3 – метаемый заряд ВВ; 4 – система возбуждения детонации; 5 – основание

Перед сваркой поверхности обеих свариваемых деталей должны быть тщательно зачищены и обезжирены. Привариваемая (подвижная) деталь (метаемая пластина) размещается под углом или параллельно неподвижной детали-мишени (основанию) с небольшим зазором. На подвижной пластине равномерно размещается слой взрывчатого вещества совместно с детонатором. Детонатор инициирует контролируемый направленный взрыв, который приводит в движение подвижную деталь. Воздействие осуществляется ударной волной, образующейся в результате инициирования взрывчатых веществ. В результате подвижная часть с большой скоростью (порядка нескольких сотен метров в секунду) ударяется о неподвижную. В месте соударения возникает эффект кумуляции – из зоны соударения с очень высокой скоростью выбрасывается кумулятивная струя, очищая свариваемые поверхности в момент, предшествующий их соединению. При обычно применяемых режимах сварки со свариваемых поверхностей удаляется слой металла суммарной толщиной от 1 до 15 мкм.

Соударение метаемой пластины и основания сопровождается пластической деформацией, которая вызывает местный нагрев поверхностных слоев металла, приводя к увеличению площади физического контакта и образованию сварного соединения.

При сварке взрывом труб взрывчатое вещество с детонатором располагают на стыке. При сварке полых труб для предотвращения деформации внутри каждой трубы помещают металлический сердечник.

При сварке взрывом важно точно рассчитать тип и количество взрывчатки. В противном случае возможна деформация или повреждение свариваемых поверхностей.

В качестве взрывчатых веществ могут использоваться аммониты, аммиачная селитра, аммонал, гранулит, гранулотол, гексоген и другие. Наиболее распространенным взрывчатым веществом для сварки является игданит (смесь аммиачной селитры и углеводородного горючего вещества, чаще всего дизельного топлива).

Количество взрывчатого вещества (ВВ) может колебаться в широких пределах, но в большинстве сварочных работ используется от 10 до 1000 кг ВВ. Большая часть выделяющейся при взрыве энергии излучается в окружающую среду в виде ударных волн, сейсмических возмущений, разлета осколков. Воздушная ударная волна представляет собой наиболее опасный поражающий фактор. Поэтому сварку взрывом необходимо осуществлять на открытых и подземных полигонах на значительном расстоянии от жилых и промышленных объектов, а также во взрывных камерах.

После сварки, как правило, требуется правка полученного соединения, которая производится с помощью валков или на прессе.

Сварное соединение имеет вид волнистой линии вдоль направления взрыва, амплитуда которой зависит от угла и скорости детонации.

Сварка взрывом не требует дополнительного нагрева свариваемых заготовок и расходных материалов, за исключением взрывчатого вещества. Высокая скорость процесса (микросекунды) обеспечивает высокую производительность сварки. При этом не успевает развиваться объемная диффузия, поэтому этот вид сварки применяется для соединения разнородных металлов и сплавов, включая композиции, которые невозможно сварить другими способами, например, сталь – титан, сталь – алюминий и др. При этом сварка взрывом практически не имеет ограничений по размерам свариваемых деталей, обеспечивая формирование прочных соединений разнородных металлов.

К числу основных недостатков сварки взрывом относятся:

- низкий уровень управляемости процессом (мощную взрывную волну сложно контролировать);
- необходимость соответствующей квалификации для допуска к работе;
- специальные требования к безопасности (осуществлять процесс можно только в специальных защитных камерах или на оборудованных полигонах);
- сравнительно длительная подготовка (для точного расчета типа взрывчатого вещества и его закладки);
- сложность автоматизации, сильная зависимость от человеческого фактора.

Технология сварки взрывом активно применяется в промышленных масштабах в нефтехимической промышленности для плакирования листовых и цилиндрических деталей (стержней, труб, контейнеров), надежной фиксации стыков труб; создания биметаллических заготовок. Кроме того, метод используется при производстве термостойких и коррозионно-стойких конструкций для металлургии, литейного производства, машиностроения и судостроения, атомной энергетики, емкостей в химической промышленности. Сталь-алюминиевые композиты используют при производстве электродов. Конструкции, полученные сваркой взрывом, успешно используются при строительстве морских сооружений, так как при этом удается значительно уменьшить или вовсе устранить электрохимическую коррозию в морской среде. Тонкие слои защитных материалов, нанесенных сваркой взрывом, защищают от радиационного излучения космические спутники.

Основным ограничением для использования сварки взрывом являются требования техники безопасности на конкретном производстве.

2.3.14. Диффузионная сварка

Под диффузией понимают обусловленное тепловым движением взаимное проникновение частиц одного вещества в другое при их соприкосновении. Скорость диффузии зависит от температуры соединяемых материалов, расстояния между элементарными частицами, а также от состояния контактирующих поверхностей (наличия загрязнений и окисления). В естественных условиях процесс диффузии протекает медленно.

Диффузионная сварка основана на использовании эффекта принудительной диффузии. Процесс диффузионной сварки осуществляется под давлением при одновременном нагреве свариваемых поверхностей с применением защитной среды, позволяющей предотвратить окисление и загрязнение контактных поверхностей.

Обезжиренные и тщательно зачищенные свариваемые заготовки собирают, помещают в вакуумную камеру с остаточным уровнем давления до 10^{-5} мм ртутного столба (давление $133 \cdot (10^{-3} - 10^{-5})$ Па) либо наполняют среду инертным газом и собирают в приспособлении, позволяющем передавать давление в зону стыка, вакуумируют и нагревают до температуры сварки. После этого прикладывают сжимающее давление на заданный период времени и нагревают специальным источником тепла (индукционным, электроконтактным, радиационным, высокочастотным, лучевым) до определенной температуры, способствующей диффузии. В зависимости от природы материала это может быть температура, близкая к температуре рекристаллизации металла, текучести либо термодеструкции полимера. Низкое давление в камере способствует удалению (испарению) поверхностных пленок, а совместное действие нагревания и давления приводит к уменьшению неровностей поверхностей и сближению их до расстояния, позволяющего сформировать межатомные связи и обеспечить взаимную диффузию поверхностных атомов в близлежащие слои. Это позволяет повысить эффективность диффузионных процессов, увеличить их скорость, сделав свариваемые поверхности более пластичными.

После достижения требуемой температуры к области соединения прикладывается необходимое давление (порядка 4 кгс/мм^2). Оно может быть разных типов – длительное или кратковременное, локальное или одновременно распределенное. Давление требуется для ускорения взаимной диффузии атомов соединяемых поверхностей. Благодаря давлению происходит разрушение оксидных пленок с их последующим удалением, а также разрушение шлака, образывающегося на поверхности металла при нагреве. Это создает условия для максимального сближения свариваемых поверхностей (позволяет им взаимодействовать на молекулярном уровне), а также создает условия для активации диффузионных процессов.

В некоторых случаях после снятия давления изделие дополнительно выдерживают при температуре сварки для более полного протекания диффузионных (рекристаллизационных) процессов, способствующих формированию качественного соединения. По окончании сварочного цикла изделие охлаждают в вакууме, инертной среде или на воздухе в зависимости от типа оборудования.

Технология сварки предполагает использование оборудования с различным уровнем вакуумирования:

- низкий уровень – до 10^{-2} мм рт. ст.;
- средний уровень – от 10^{-3} до 10^{-5} мм рт. ст.;
- высокий уровень – более 10^{-5} мм рт. ст.

Для уменьшения скорости окисления свариваемых заготовок и создания условий очистки контактных поверхностей от оксидов в условиях невысокого вакуума применяют газы восстановители, расплавы солей. Оборудование позволяет также использование защитных (инертных) газов при различном уровне давления.

Оборудование, создающее давление прижима, бывает механическим и гидравлическим. Управляются они в ручном, полуавтоматическом и автоматическом режимах. Автоматическое управление осуществляется на предприятиях, работающих на серийные и массовые объемы производства.

В зависимости от приложенного давления различают диффузионную сварку:

- при высоком давлении (более 20 МПа);
- при низком давлении (до 2 МПа включительно).

По характеру приложения нагрузки различают технологические схемы с постоянной нагрузкой ниже пределов текучести. В данном случае диффузионные процессы сходны с наблюдаемыми при ползучести. Этот метод получил наибольшее распространение за счет простоты технологии.

Сварка может осуществляться с использованием динамической нагрузки, изменяющейся по направлению давления на соединяемые детали. Создается эффект пластической деформации в месте стыка за счет создания напряжения, превышающего предел текучести. Этот метод получил название диффузионной сварки с принудительной деформацией.

При диффузионной сварке соединение формируется, как и при других методах сварки: внахлест; шовным методом; встык.

Качество соединения при диффузионной сварке в вакууме определяется комплексом технологических параметров, основные из которых – температура, давление, продолжительность выдержки. Продолжительность диффузионной сварки зависит от химического состава соединяемых заготовок, степени их очистки, температуры нагрева и может составлять от нескольких секунд до часов.

Для повышения прочности сварного соединения используются дополнительные подслои, они:

- снижают барьерную границу основных слоев, увеличивают объем взаимодиффузии;
- увеличивают прочность соединений;
- снижают остаточные напряжения при структурной деформации соединяемых деталей;
- позволяют снизить температуру в рабочей зоне и давление сжатия.

Типичная толщина подслоя составляет от 2 до 7 микрон. Подслой выбирается по параметрам коэффициента диффузии основных деталей. У подслоя они ниже.

Для некоторых соединений применяют медную, золотую, никелевую и серебряную фольгу. При соединении металлов и неметаллов металлы предвари-

тельно окисляют или сульфидируют для ускорения процесса взаимной диффузии соединяемых элементов. Оксидный или сульфидный слой выполняет функцию подслоя.

В отличие от традиционных способов сварки плавлением, при диффузионной сварке образуется однородный сварной шов без заметных отклонений от первоначальных физико-химических характеристик материалов, не требующий последующей механической обработки. Достоинством этого способа является возможность соединения заготовок из различных материалов (металлов, пластика, стекла, керамики, сложных композитных смесей). При этом характеристики свариваемых поверхностей могут отличаться кардинально, например, пористые материалы могут легко свариваться со слоистыми; тугоплавкие материалы с непластичными чистыми металлами; композиты с танталом, ниобием, вольфрамом; полимеры с различной температурой плавления; однородные и многокомпонентные полупроводники; графит, кварц, стекло – с металлами и сплавами и др. Метод позволяет соединять сразу несколько заготовок и сваривать заготовки различных размеров, формы и толщины (от долей миллиметра до нескольких метров). Процесс можно считать экологически чистым – он не предусматривает горения и вредных выбросов в атмосферу. При диффузионной сварке нет необходимости в использовании припоев, электродов и прочих расходных материалов.

Диффузионная сварка применяется для соединения металлов, которые плохо свариваются плавлением, а конструкции работают в условиях повышенных температур и значительных нагрузок. Основная сфера использования диффузионной сварки – высокие технологии в авиакосмической области и машиностроении. Диффузионную сварку применяют в приборостроении и электронике. Метод позволяет создавать компоненты микроэлектроники, многослойные пустотелые конструкции типа панелей из титановых или алюминиевых сплавов с наполнителем сложной формы (гофры, соты, ребра и др.) путем совмещения диффузионной сварки и формообразования в режиме сверхпластичности. Диффузионная сварка находит применение в изготовлении крупногабаритных заготовок деталей сложной формы, получение которых механической обработкой, методами обработки давлением или литьем невозможно либо неэкономично. Особенно эффективно применение диффузионной сварки в опытном и мелкосерийном производстве.

К основным недостаткам диффузионной сварки следует отнести сложность технологического процесса и необходимость использования специфического дорогостоящего оборудования; низкую универсальность и сравнительно высокую длительность процесса; трудности с загрузкой заготовок и выгрузкой готовых изделий из рабочей камеры при организации непрерывного процесса изготовления сварных изделий; высокие требования к качеству контактных поверхностей, точности сборки и необходимости контроля температуры, а также высокая квалификация операторов.

Поэтому метод диффузионной сварки применяется там, где ему нет аналогичной замены: в робототехнике, приборостроении, при изготовлении металло-керамических и композитных компонентов, катодных узлов, сложных полупроводниковых переходов и др.

Принципиальная схема установки для диффузионной сварки в вакууме представлена на рисунке 2.47. Свариваемые заготовки 5 помещают в вакуумную камеру 3, в которой создается разрежение. Нагрев осуществляется специальным источником тепла. Сжимающее усилие на свариваемые детали передается от силового механизма 6.

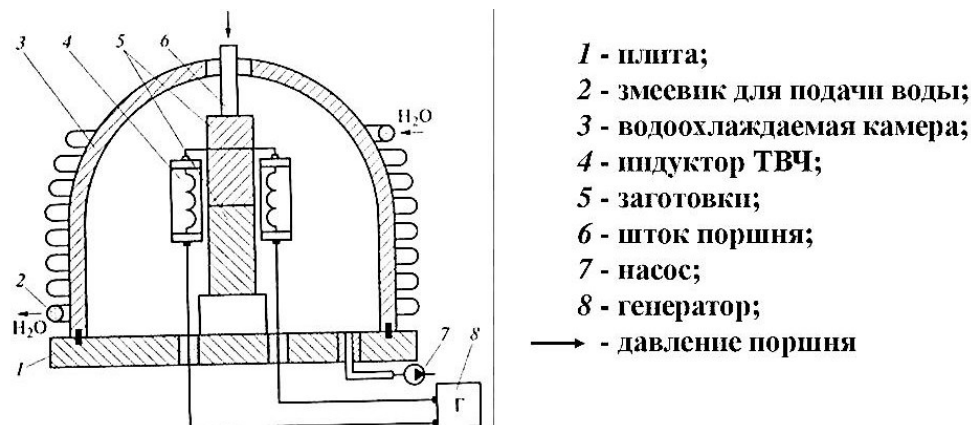


Рис. 2.47. Принципиальная схема установки для диффузионной сварки в вакууме

2.3.15. Сварка трением

Сварка трением относится к альтернативным сварочным технологиям и является разновидностью сварки давлением, при которой механическая энергия, подводимая к одной из свариваемых заготовок, преобразуется в тепловую, а сварной шов формируется без использования внешних источников тепла и расплавления материалов. Сварку трением называют также «фрикционной сваркой», поскольку формирование сварного соединения осуществляется в твердом состоянии при взаимном скольжении двух прижатых друг к другу твердых тел (рис. 2.48). Трение поверхностей осуществляется вращением или возвратно-поступательным перемещением свариваемых заготовок, сжимаемых между собой с постоянным или возрастающим со временем усилием.

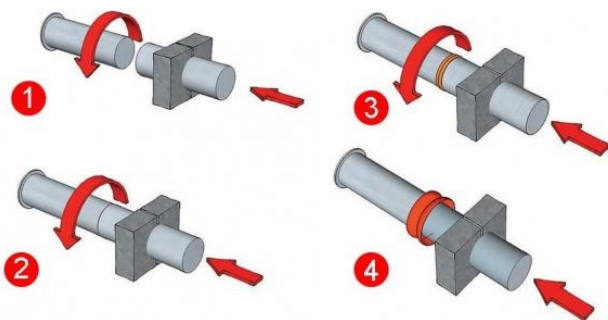


Рис. 2.48. Процесс сварки трением

В процессе трения микровыступы сминаются, в результате нагрева и сжатия происходит совместная пластическая деформация. Оксидные и адсорбированные пленки, присутствующие на соединяемых металлических поверхностях, в процес-

се трения разрушаются и удаляются в радиальных направлениях. Сварное соединение образуется в результате возникновения металлических связей между чистыми (ювенильными) контактирующими поверхностями свариваемых заготовок. Это позволяет обеспечить надежную металлическую связь по всей поверхности свариваемых деталей и получить высокопрочное соединение.

Параллельно со сваркой протекают процессы разрушения связей в результате относительного движения поверхностей. Рост температуры в зоне контакта приводит к формированию тонкого слоя пластифицированного металла. Под действием сжимающего усилия происходит вытеснение металла из стыка (в грат) и сближение активированных свариваемых поверхностей (осадка), сопровождающиеся образованием металлических связей. После этого важно быстро прекратить движение, чтобы обеспечить теплоотвод от нагретой области стыка.

В зависимости от схемы процесса различают сварку вращением, вибротрением и инерционную сварку. Параметры режима сварки трением зависят от свойств свариваемого металла, площади контакта и конфигурации изделия.

Наиболее распространена сварка вращением, при которой в контакт приводят соосно закрепленные детали, одна из которых неподвижна, а другая вращается (рис. 2.48). После достижения необходимой температуры (обычно через 3–25 сек после начала вращения) деталь останавливают и охлаждают сварной шов под давлением.

При сварке длинномерных деталей можно использовать вращающийся промежуточный элемент (в этом случае обе соединяемые заготовки закреплены неподвижно), изготавливаемый из металла, например, алюминия, или из пластмассы. Элемент из пластмассы оставляют в сварном шве, а металлический удаляют, после чего соединяемые детали приводят в контакт и охлаждают.

Сваркой вращением соединяют стержни и трубы, а также присоединяют цилиндрические детали к плоским и фасонным. Основное достоинство этого способа – высокая скорость образования шва.

Инерционная сварка осуществляется при вращении деталей за счет энергии, предварительно запасенной вращающимся маховиком. Это позволяет существенно уменьшить мощность двигателя. Продолжительность нагрева (торможения) обычно составляет менее 2 секунд.

Отличительной особенностью сварки вибротрением является возвратно-поступательное движение одной из свариваемых заготовок в плоскости трения с относительно малыми амплитудами. В этом случае можно сваривать детали с различной формой поперечного сечения. Частота колебаний составляет 50–400 Гц, максимальная амплитуда 3–6 мм. Продолжительность сварки не зависит от толщины детали и составляет несколько секунд.

Интересно применение комбинированной сварки трением, при которой первая стадия осуществляется при вращении детали от электродвигателя с обычной для классического способа линейной скоростью до износа всех неровностей поверхности, а вторая – при вращении детали от маховика, разогнанного до той же скорости на первой стадии процесса. В этом случае удастся реализовать положительную специфику инерционной сварки, избавившись от ее минусов: высокой

скорости вращения, связанными с этим трудностями создания оборудования, а также высокими требованиями к предварительной подготовке поверхности.

Для сварки трением деталей некруглого сечения может быть использована орбитальная сварка, при которой две свариваемые детали, поджатые осевым усилием, синхронно вращаются в одну сторону, а оси вращения деталей смещены на величину эксцентриситета. При этом каждая точка контакта описывает окружность с радиусом, равным эксцентриситету. Процесс нагрева прекращается совмещением осей вращения деталей.

Для тех случаев, когда не удастся получить работоспособное соединение из конкретных разнородных металлов, предложено осуществлять сварку трением через прослойку из третьего металла, хорошо соединяющегося с каждым из первых двух. Так, соединение легированных алюминиевых сплавов можно успешно осуществлять со сталью через прослойку из технически чистого алюминия.

Оборудование для сварки трением должно быть рассчитано на работу при достаточно больших скоростях вращения и осевых усилиях и предусматривать возможность быстрого запуска и остановки шпинделя машины.

К числу основных преимуществ сварки трением относятся высокое качество сварных соединений (практически без пор, раковин и оксидов), отсутствие вредных выделений и высоких требований к чистоте поверхностей, легкость механизации и автоматизации. При правильно выбранном режиме сварки прочность и пластичность сварного шва и прилегающих областей сравнимы с основным металлом. Сварка трением требует значительно меньших затрат энергии (до 10 раз ниже по сравнению с контактной сваркой), мощности и расходных материалов. Причем скорость сварки трением значительно выше по сравнению с электродуговой.

В настоящее время сварка трением применяется в машиностроении, судостроении, приборостроении, нефтегазовой отрасли, ядерной энергетике, авиакосмической промышленности, ракетостроении, строительной индустрии, сельхозмашиностроении, электротехнике и энергомашиностроении, станкостроении и др.

Сварка трением особенно перспективна при соединении трудносвариваемых или несваривающихся другими способами материалов, например, меди со сталью или алюминием, алюминия с титаном и др. Ее целесообразно применять при массовом или серийном производстве. Эффективно применение сварки трением и для работы с термопластами.

Сварку трением широко используют при изготовлении режущего (сверл, метчиков, разверток и др. из углеродистой и быстрорежущей стали) и мерительного инструмента, для изготовления зубчатых колес, штоков с поршнями, ступенчатых валов и осей, составных пуансонов; при производстве составных сварно-кованых, сварно-литых или сварно-штампованных конструкций, заклепочных соединений в авиастроении.

Однако применение сварки трением ограничено формой и размерами сечения деталей (необходимо, чтобы обе или одна из деталей представляли собой тело вращения (стержень или трубу), ось которого совпадает с осью вращения). Сварку трением нецелесообразно применять для сварки деталей диаметром ме-

нее 3,5 мм и более 200 мм из-за технологических ограничений и высокой стоимости изготовления и эксплуатации такого оборудования.

В последние годы активно развивается разновидность сварки трением – сварка трением с перемешиванием. Сущность метода заключается в использовании специального вращающегося инструмента из тугоплавкого материала высокой прочности (рис. 2.49). Вращаясь и нагревая металл, он проникает в него по линии контакта заготовок. За счет вращательного движения, в которое вовлекаются поверхностные слои размягченного нагревом металла заготовок, происходит перемешивание этих слоев. Так обеспечивается равномерность структуры и характеристик шовного материала.

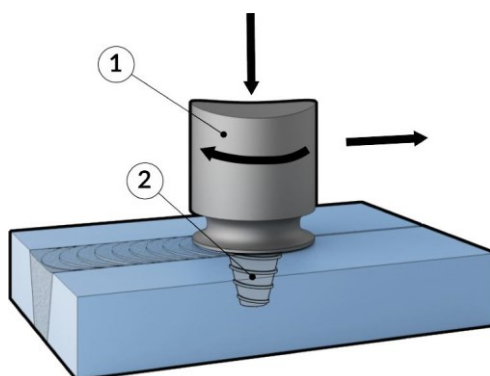


Рис. 2.49. Процесс сварки трением с перемешиванием

Соединение заготовок трением с перемешиванием не требует предварительной подготовки поверхности. Очистка и удаление поверхностных пленок осуществляются сварочным инструментом. После закрепления заготовок на опорном столе выполняются следующие операции:

Вращающийся стержень 1 выступающей частью 2 погружается в стык свариваемых заготовок, разогревая материал до пластичного состояния. Утолщенная часть вращающегося стержня, называемая буртом или заплечником, упирается в металл, ограничивая движение стержня вглубь и предотвращая растекание материала.

Одновременно с вращением инструмент линейно перемещается вдоль шва, формируя сварочную ванну и перемешивая материал. Передаваемое буртом усилие уплотняет материал и придает зоне пластичного течения направленную форму. Для облегчения движения ось инструмента слегка наклонена вперед по ходу движения (угол наклона обычно составляет $1,5\text{--}4,5^\circ$).

По мере движения наконечника инструмента материал шва остывает, образуя прочное соединение. После завершения движения инструмент извлекают. *В конечной точке обычно остается небольшое отверстие от наконечника.* Основными параметрами, определяющими качество сварки, являются:

- усилие, создаваемое инструментом;
- скорость подачи сварочной головки;
- величина бурта;
- окружная скорость вращения стержня;

- угол наклона;
- усилие подачи стержня.

Правильно подобранный режим сварки обеспечивает близость структуры и механических характеристик (усталостная прочность, прочность на изгиб и растяжение, ударная вязкость) шва основному металлу и низкую остаточную деформацию.

Сварка трением с перемешиванием (СТП) может служить альтернативой технологиямковки, штамповки, литья и считается особенно перспективной для производства изделий из трудно соединяемых материалов, например, сталей со структурой аустенита и перлита, стали с алюминием или бронзой.

К настоящему времени СТП нашла применение в автомобилестроении для сварки алюминиевых деталей (силовые элементы, такие как подрамники, а иногда и кузова), в строительстве (алюминиевые опорные фермы, пролеты мостов), железнодорожном транспорте (рамы, колесные тележки, вагоны), судостроении (переборки, элементы конструкции), авиастроении (топливные баки, части фюзеляжа), пищевой промышленности (различные емкости для жидких продуктов, таких как молоко, пиво), электротехнике (корпуса электродвигателей, параболические антенны).

Кроме алюминиевых сплавов сварка трением с перемешиванием успешно применяется для получения соединений меди, например, при производстве медных контейнеров для захоронения отработанного радиоактивного топлива.

К числу специфических преимуществ метода относят высокое качество сварного шва (отсутствуют поры и раковины, металл в зоне соединения имеет однородную структуру). Достоинствами метода являются высокая производительность и энергоэффективность процесса. Толщина слоя, который нагревается в результате трения, невелика, поэтому процедура сваривания занимает обычно от нескольких секунд до одной минуты. При этом тепло выделяется локально, в ограниченных объемах, что позволяет сократить расходы энергии почти в 10 раз по сравнению со стыковой контактной сваркой.

Однако оборудование может быть неудобным и громоздким. Процесс не относится к универсальным. Сварной шов имеет характерную радиальную структуру, и при определенных видах деформации либо при работе в агрессивной среде может развиваться коррозионное или усталостное разрушение сварного шва.

2.3.16. Сварка токами высокой частоты

Сварка ТВЧ представляет собой способ контактной сварки, при которой сварочный процесс осуществляется за счет нагрева соединяемых поверхностей с применением переменного тока высокой частоты (10–450 кГц).

Сварка ТВЧ основана на следующих эффектах.

Плотность переменного тока, протекающего по металлическому проводнику, распределена неравномерно по его сечению. Она максимальна на поверхности проводника и резко уменьшается по мере удаления от поверхности вглубь. Толщина этого поверхностного слоя (глубина проникновения тока) тем

меньше, чем выше частота тока. Поэтому при высокой частоте ток проходит лишь по тонкому поверхностному слою проводника.

Еще один важный эффект использования ТВЧ заключается в том, что токи высокой частоты, протекающие в двух параллельных проводниках и имеющие противоположные фазы, стремятся пройти по путям, находящимся в максимальной близости один от другого. Это явление позволяет управлять распределением тока высокой частоты по поверхности металла и обеспечивать равномерный нагрев в строго ограниченной зоне.

Таким образом, при сварке ТВЧ обеспечивается высокая скорость и эффективность нагрева в зоне сварки. Нагретые кромки обжимаются и свариваются.

При высокочастотной сварке заготовки нагреваются двумя способами:

- вихревыми токами, наводимыми в свариваемом изделии магнитным полем близко расположенного к изделию индуктора, подключенного к генератору тока высокой частоты (индукционная схема токоподвода – рис. 2.50);

- протекаемым по свариваемому изделию током в том случае, когда изделие включено непосредственно в цепь высокочастотного генератора (кондукционная схема токоподвода – рис. 2.51).

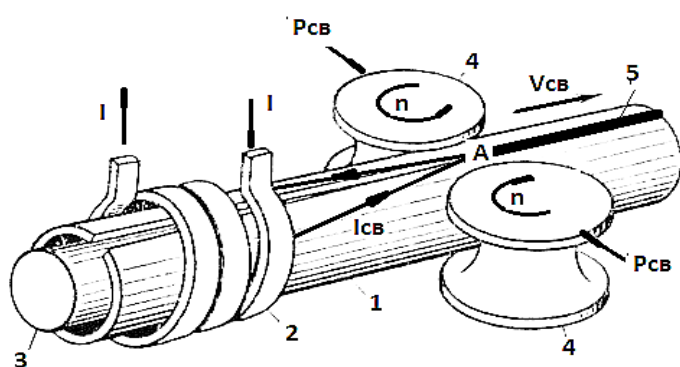


Рис. 2.50. Индукционная схема токоподвода

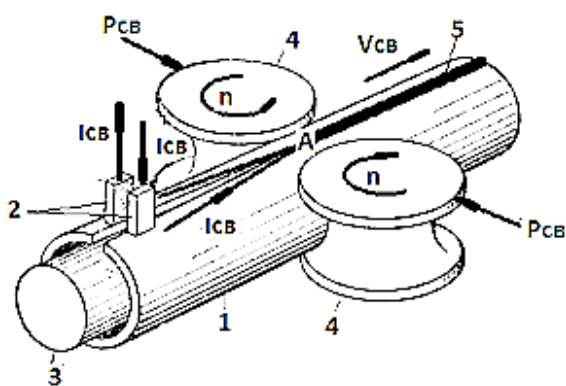


Рис. 2.51. Кондукционная схема токоподвода

В соответствии с этим, в зависимости от способа передачи энергии, высокочастотная сварка делится на два вида: индукционную и контактную.

При *индукционной* сварке трубная заготовка 1 (рис. 2.50), имеющая зазор между кромками, помещается внутрь кольцевого индуктора 2 и зажимается в обжимных валках 4 с усилием $P_{св}$. Под действием усилия сжатия зазор между кромками приобретает V-образную форму с вершиной в точке A, где обеспечивается контакт кромок. Валки 4 приводятся во вращение и перемещают исходную заготовку со скоростью $V_{св}$. Ток I , поступающий от высокочастотного генератора, создает в индукторе магнитное поле, которое наводит в металле свариваемой заготовки электрический ток $I_{св}$. Сварочный ток $I_{св}$, проходя по периметру заготовки и встречая зазор между свариваемыми кромками, отклоняется к точке схождения кромок A (вершина V-образного зазора). В точке A создается максимальная концентрация энергии, что обеспечивает быстрый нагрев металла до температуры термопластического состояния (температура, при которой обеспечивается необ-

ходимость пластичность металла). Наличие ферритового сердечника 3 способствует большей концентрации энергии в кромках заготовки и тем самым уменьшает ширину зоны их разогрева. Обжимные ролики 4, одновременно с перемещением свариваемого изделия со скоростью сварки $V_{св}$, обеспечивают сжатие нагретых кромок заготовки с усилием $P_{св}$, что способствует формированию сварного шва 5 и образованию сварного соединения.

Индуктор может иметь различную форму:

- кольцевой индуктор может охватывать заготовку снаружи или находиться внутри нее;

- стержневой индуктор позволяет расходовать меньше энергии за счет направления энергии непосредственно в место соединения. Использование нескольких индукторов позволяет регулировать степень нагрева.

При *контактной* сварке трубная заготовка, имеющая зазор между кромками, зажимается в обжимных валках 4 (рис. 2.51) с усилием $P_{св}$. Под действием усилия сжатия зазор между кромками приобретает V-образную форму с вершиной в точке А, где обеспечивается контакт кромок. Валки 4 приводятся во вращение и перемещают исходную заготовку со скоростью $V_{св}$. Ток $I_{св}$, поступающий от высокочастотного генератора, подводится к кромкам свариваемого изделия через скользящие токоподводящие контакты 2. Проходя по периметру заготовки и встречая зазор между свариваемыми кромками, ток отклоняется к точке схождения кромок А (вершина V-образного зазора). В точке А создается максимальная концентрация энергии, что обеспечивает быстрый нагрев металла до температуры термopластического состояния (температура, при которой обеспечивается необходимая пластичность металла). Наличие ферритового сердечника 3 способствует большей концентрации энергии в кромках заготовки и тем самым уменьшает ширину зоны их разогрева. Обжимные ролики 4, одновременно с перемещением свариваемого изделия со скоростью сварки $V_{св}$, обеспечивают сжатие нагретых кромок заготовки с усилием $P_{св}$, что способствует формированию сварного шва 5 и образованию сварного соединения.

Электроды не только подводят энергию к зоне шва, но и выполняют роль элементов, передающих давление на материал и охлаждающих его поверхность.

В зависимости от степени нагрева и величины обжатия процессы сварки ТВЧ подразделяются на три группы:

- давлением с оплавлением. Механизм заключается в предварительном нагреве соединяемых поверхностей и их местном расплавлении. Расплавленный материал удаляется из сварочной зоны при осадке. Шов формируется в твердом состоянии;

- давлением без оплавления. Свариваемые поверхности предварительно нагреваются до температуры, значение которой ниже температуры плавления металла;

- плавлением без давления. Нагрев элементов осуществляется до оплавления. Сварочная ванна застывает, и шов образуется без приложения давления.

Сварка возможна с применением присадочного материала и без него.

Режим сварки определяется величиной и частотой сварочного тока, усилием (давлением) сжатия и скоростью сварки.

Сварка осуществляется на ручных или стационарных установках прессового или роликового типа, включающих генератор ТВЧ, электрододержатели, механизм привода электродов и устройство для их экранирования.

В зависимости от формы электродов, через которые передается сжимающее усилие, сварка может быть прессовой или роликовой. В первом случае конфигурация электродов соответствует конфигурации сварного шва, и его можно сформировать за один проход.

Во втором – вращающиеся ролики позволяют формировать швы произвольной конфигурации.

Основные достоинства сварки токами ТВЧ связаны с особенностями нагрева – высокой скоростью, равномерностью, возможностью избирательного подвода тепла.

Вследствие большой скорости нагрева (до 1 500 °C/с) скорость сварки может достигать десятков и даже сотен метров в минуту, намного превышая скорость контактной, шовной или дуговой сварки. При этом зона термического влияния очень мала и составляет около 0,2 мм. Сварка ТВЧ по сравнению с контактной шовной сваркой уменьшает затраты энергии в 3–4 раза.

Высокочастотной сваркой могут свариваться различные стали, в том числе высоколегированные и коррозионностойкие, медные и алюминиевые сплавы, полимерные материалы, а также соединения из разнородных материалов толщиной 0,8–14 мм. Полученные соединения обладают высокой механической прочностью и отличаются стабильностью качества, поскольку процесс высокочастотной сварки обычно полностью автоматизирован и может осуществляться как в обычной атмосфере, так и в защитных газах, вакууме или с применением флюсов.

Высокочастотная сварка находит применение в производстве прямошовных и спиральношовных труб из цветных и черных металлов; тавровых и двутавровых балок в судостроении; оболочек электрических кабелей. Метод эффективен при непрерывном процессе массового изготовления изделий простой конфигурации.

Самым распространенным способом изготовления электросварных труб является сварка ТВЧ с использованием контактного токопровода или трансформатора благодаря концентрированному выделению теплоты в зоне сварки. Использование этой схемы позволяет более экономно расходовать энергию и увеличить перечень свариваемых изделий. Однако к недостаткам этой схемы относятся недолговечность контактного элемента и его малая износостойкость.

К преимуществам индукционной сварки можно отнести быстрый нагрев, отсутствие признаков механического воздействия от индукторов и продолжительный срок работы индуктора по сравнению с контактами. Однако при такой схеме требуется высокая мощность из-за растекания энергии по всей поверхности изделия, а обеспечить равномерный зазор между индуктором и деталью сложно.

2.3.17. Ультразвуковая сварка

Ультразвук – это звуковые волны, которые перемещаются в пространстве подобно фотонам света. Однако в отличие от световых волн, которые могут

распространяться в вакууме, ультразвуку для распространения требуется упругая среда, например, газ, жидкость или твердое тело.

Метод ультразвуковой сварки основан на нагреве соединяемых поверхностей в результате превращения энергии механических ультразвуковых колебаний с частотой 15–50 кГц в тепловую энергию.

Соединяемые детали зажимают между торцом инструмента и опорой (рис. 2.52). Сварка происходит в момент подачи ТВЧ от ультразвукового генератора на обмотку вибратора, выполненного из магнитострикционного или пьезокерамического материала. Продольные высокочастотные механические колебания, возникающие в этом материале вследствие магнитострикционного или пьезоэлектрического эффекта, передаются через стержневые волноводы и инструмент в зону шва. Ультразвук создает динамическое и статическое давление в зоне соединения. Происходит внутренняя и наружная деформация соединяемых материалов с выделением тепла. Это приводит к нагреву кромок, активизации диффузии в области сварки (за счет расплавления или образования вязкотекучего состояния – для полимеров) и образованию соединения в процессе затвердевания (кристаллизации).

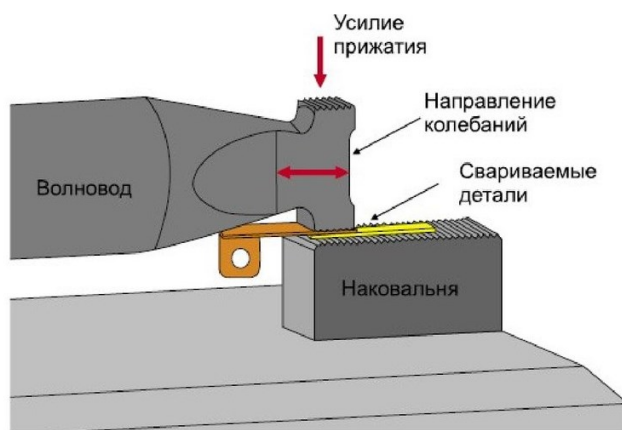


Рис. 2.52. Ультразвуковая сварка металлов

Способ подачи энергии колебаний в зону контакта заготовок определяется модулем упругости материала и коэффициентом затухания механических колебаний на ультразвуковых частотах. Типовые схемы колебательных систем для УЗК представлены на рис. 2.53.

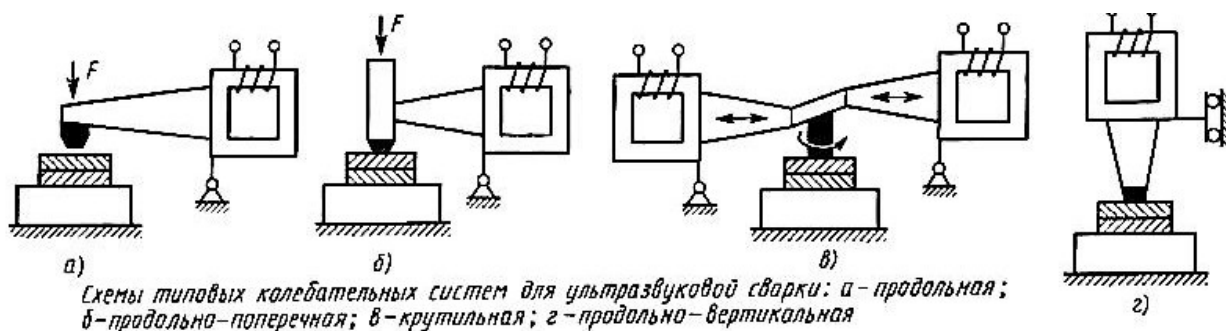


Рис. 2.53. Схемы типовых колебательных систем для ультразвуковой сварки

В зависимости от способа подвода энергии к зоне шва ультразвуковая сварка разделяется на *контактную*, при которой место ввода ультразвука удалено от соединяемых поверхностей не более чем на 5 мм, и *дистанционную*, при которой оно удалено от зоны шва на большее расстояние.

По методу движения волновода различают импульсную (работа короткими импульсами за одно перемещение волновода) и непрерывную (постоянное воздействие излучателя, волновод двигается с постоянной скоростью относительно материала) сварку.

По методу подведения энергии к рабочей зоне выделяют одностороннюю и двустороннюю сварку.

При ультразвуковой сварке детали можно сваривать заготовки *в отдельных точках (точечная сварка)*, одновременно *по всему контуру шва (контурная сварка)*, а также *при шаговом или непрерывном перемещении материала или инструмента*.

По принципу дозирования вводимой механической энергии ультразвуковая сварка подразделяется на сварку:

- с фиксированным временем протекания ультразвукового импульса;
- с фиксированной осадкой;
- с фиксированным зазором;
- с дозированием энергии по кинетической характеристике (по изменению амплитуды смещения опоры).

По степени автоматизации различают ручную (оператор контролирует параметры установки и приводит в движение сварочный пистолет); механизированную (параметры задаются оператором и поддерживаются установкой, детали подаются под излучатель) и автоматизированную (массовое производство, без участия человека) сварку.

Основной узел установки ультразвуковой сварки – генератор колебаний и преобразователь электрических колебаний в механические той же частоты. Механические колебания ультразвукового генератора преобразуются магнито-стрикционным преобразователем. Для отведения излишнего тепла используется водяная система охлаждения.

Основные регулируемые параметры ультразвукового сварочного оборудования:

- амплитуда излучения импульсов волноводом (сварочным наконечником), от нее зависит степень взаимной диффузии соединяемых материалов;
- продолжительность импульса, влияет на скорость создания швов;
- статическая нагрузка, в автоматах регулируется механическое давление пресса, на ручных аппаратах степень обжима определяется опытным путем;
- частота колебаний, от нее зависит сила давления волновода.

К дополнительным настройкам, влияющим на режим сварки, относятся:

- температура дополнительного разогрева деталей (определяется физико-механическими характеристиками материалов: твердостью, теплоемкостью, теплопроводностью, а также пространственной конфигурацией заготовки);
- высота наконечника;
- степень зажима соединяемых элементов.

Основными параметрами ультразвуковой сварки, характеризующими выделение энергии в зоне соединения, являются: амплитуда колебаний рабочего торца волновода A (мкм); частота колебаний f (кГц); продолжительность ультразвукового импульса $t_{\text{св}}$ (с) или в случае непрерывной сварки – скорость сварки $V_{\text{св}}$ (м/с); сварочное статическое давление $P_{\text{ст}}$ (Па) или усилие прижатия F (Н) волновода к материалу.

Дополнительные параметры режима сварки – размеры, форма и материал опоры и волновода; материал теплоизоляционных прокладок; температура предварительного подогрева волновода и т. д.

Основные параметры режима взаимосвязаны. Время, необходимое для сварки, зависит от амплитуды колебаний и сварочного давления. При более высоких амплитудах необходимые свойства сварных соединений могут быть достигнуты при меньшем времени сварки, и наоборот. Определяющим параметром режима ультразвуковой сварки является амплитуда колебаний рабочего торца волновода, которая выбирается в пределах 30–70 мкм. Оптимальному значению амплитуды соответствует максимальная прочность и наилучшее качество сварного соединения. Амплитуда колебаний, необходимая для обеспечения качественной сварки, связана с величиной сварочного давления и, кроме того, зависит от геометрических размеров свариваемых деталей, типа свариваемых материалов и опоры, определяющих распределение характеристик звукового поля.

Оптимальные параметры режима сварки зависят от свойств свариваемого материала, толщины и формы изделий и других факторов и устанавливаются в каждом конкретном случае экспериментально. Оценка режима обычно проводится по показателям прочности сварного соединения. Кроме того, его проверяют на герметичность, деформацию и другие характеристики.

Свойства сварных соединений зависят не только от параметров режима сварки, но и от рабочего цикла. Рабочий цикл определяется последовательностью приложения давления, включения, прохождения и выключения ультразвукового импульса, выдержки изделия под давлением и снятия давления. Цикл сварки закладывается в основу выбора схемы механизма давления и включения ультразвуковых колебаний сварочных машин.

Для ультразвуковой сварки металлов требуются нагрев до высоких температур и приложение больших усилий сжатия.

Для пластиков можно обойтись намного меньшими значениями этих параметров. При сварке ряда термопластичных материалов, например, полиэтилен-терефталатных или полиамидных пленок, соединение образуется при более низких температурах, чем $T_{\text{пл}}$. Предполагают, что под воздействием ультразвука в микрообъемах происходит механическая деструкция полимера, способствующая снижению $T_{\text{пл}}$. При этом не исключен также мгновенный и локальный нагрев до $T_{\text{пл}}$. При ультразвуковой сварке возможно образование химических связей в переходном слое.

По сравнению с другими способами сварки, ультразвуковые установки отличаются простотой конструкции, а сам процесс – низкой себестоимостью и трудоемкостью. Ультразвуком можно соединять разнородные материалы с большой

разницей в температуре плавления толщиной от нескольких микрон до нескольких миллиметров. При использовании ультразвука к минимуму сводятся искажения формы свариваемых заготовок. Однако для толстостенных деталей для ускорения процесса нужен предварительный разогрев индукционными токами.

Для ультразвуковой сварки характерны следующие основные особенности:

- концентрация тепловыделения в зоне шва и связанные с этим высокая скорость образования шва и минимальное изменение свойств материала; соединение металлов проходит при существенно более низких температурах, чем при использовании «горячих» сварочных технологий, таких как электродуговая или газовая сварка. Это открывает широкие возможности для быстрого и надежного соединения компонентов, чувствительных к перегреву;

- возможность сварки загрязненных поверхностей, т. к. все инородные частицы удаляются из зоны шва в результате сдвиговых колебаний;

- возможность подвода механической энергии на значительном расстоянии от места сварки, что позволяет сваривать детали больших толщин и в труднодоступных местах (при этом второй электрод не требуется).

Области применения ультразвука для создания сварных соединений определяются исходя из характерных особенностей технологии:

- соединяемые материалы должны быть пластичными;

- их размеры ограничены, прежде всего – толщина;

- температура нагрева намного ниже, чем при использовании «горячих» сварочных технологий.

Технология получила широкое распространение в следующих областях: приборостроение, электроника, производство пластиковых оболочек, выпуск пластмассовых изделий.

Применяется метод и в других отраслях для присоединения малогабаритных деталей к крупным.

Высокой эффективностью отличается применение ультразвуковой сварки к деталям небольших размеров. Особенно эффективен метод в микроэлектронике и приборостроении.

Кроме того, метод способен сваривать пары металлов, с трудом соединяемые другими способами: Cu+Al, Al+Ni, пластик, керамику, композиты, стекло в любых комбинациях. Применим он и к тугоплавким сплавам.

В промышленных масштабах метод применяется для производства изделий из полиамида и легкоплавкого пластика: оправ для очков, упаковок, игрушек, мелких деталей и др.

Основное ограничение, накладываемое на применимость технологии, – это размер свариваемых заготовок (не более 25–30 см). Это обусловлено малой мощностью генератора и высоким затуханием и рассеиванием ультразвуковых колебаний в твердой среде. Ограничены возможности метода по работе со сверхтонкими материалами. Кроме того, материалы, свариваемые ультразвуком, должны иметь минимальную влажность, причем и на поверхности, и в объеме.

К минусам относят невозможность соединения толстостенных элементов, сложность оборудования. Для работы на нем нужна практика. Малая мощность

излучателя заставляет подводить энергию с двух сторон. Сложность контроля качества шва. Качество соединения сильно зависит от точности подбора и стабильности параметров установки во время работы.

Благодаря перечисленным достоинствам ультразвуковая сварка развивается более интенсивно, чем другие методы сварки.

2.4. Дефекты структуры и контроль качества сварных соединений

2.4.1. Дефекты в сварных соединениях

На рисунке 2.54 представлены изображения основных видов дефектов, наблюдаемых в *сварных соединениях*.

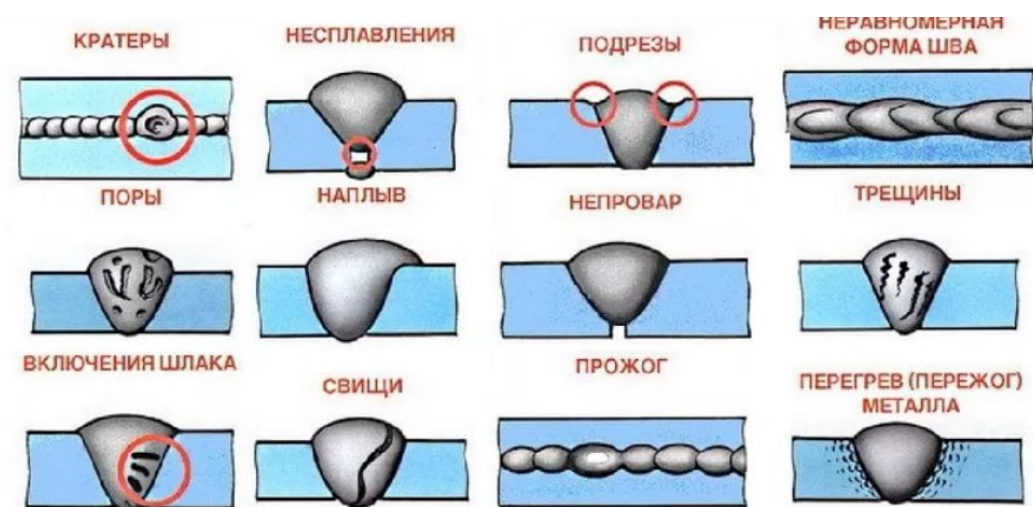


Рис. 2.54. Дефекты сварных соединений

К наиболее распространенным дефектам сварных соединений относят следующие:

- наплыв (кромки не прогреты, много наплавленного (электродного) металла);
- подрез (кромки недогреты, мало наплавленного (электродного) металла);
- непровар (низкий сварочный ток, большая скорость сварки при малой силе тока и недостаточном времени его протекания, завышенном давлении или большом диаметре электродов, при плохой зачистке свариваемых поверхностей);
- утяжки (неравномерный режим сварки).

Пережог, или выплеск расплавленного металла, возникает при недостаточном давлении и малом диаметре электродов, слишком высоком токе или завышенном времени его включения, плохой зачистке деталей или электродов, малом удалении электродов от кромок деталей, перекосе деталей относительно электродов.

Горячие трещины образуются в шве и в зоне термического влияния (околошовной зоне) при температуре, близкой к температуре плавления.

Трещины и радиальные раковины обусловлены малым временем включения тока, малым временем проковки и недостаточным давлением на электродах.

Между зернами могут образоваться легкоплавкие прослойки (обычно эвтектика с серой), по которым и происходит разрушение под действием сварочных напряжений. Для предотвращения образования дефектов такого типа эффективны снижение количества примесей (особенно серы) в металле шва, правильный выбор режима сварки и формы шва.

Холодные трещины чаще всего образуются в шве и в зоне термического влияния при температуре, близкой к комнатной, в результате насыщения шва водородом (флокены), образования закалочных структур, роста зерна. Для предотвращения их образования используются снижение количества углерода, предварительный подогрев свариваемых деталей, защита шва от насыщения водородом.

Поры образуются, как правило, при низкой жидкотекучести металла шва, плохой газопроницаемости шлаковой пленки, слишком высокой скорости охлаждения. Газы попадают в жидкий металл либо из воздуха (при плохой защите сварочной дуги), либо через сварочные материалы (плохо очищенные кромки заготовки, влажные электроды). Попадая в металл, газы растворяются в нем при высокой температуре, а при последующем охлаждении выделяются из-за снижения растворимости. Соответственно, для защиты от пористости применяют надежные способы защиты дуги, зачистку кромок, тщательную подготовку сварочных материалов, а также подбирают технологию и режим сварки. Если дефекты все же образуются, их рекомендуют вырезать и снова заварить это место.

В процессе изготовления сварных конструкций в них возникают напряжения и деформации, в результате неравномерного нагревания заготовок при сварке, усадке и структурных превращениях в металле или в зоне термического влияния (ЗТВ) в процессе охлаждения. Сварочные напряжения, превышающие предел текучести металла, вызывают пластическую деформацию конструкции, что приводит к изменению размеров и формы изделия. Такие дефекты получили название коробления. Для предотвращения коробления важно правильно выбрать схему сборки изделия, порядок наложения швов и режим сварки.

При контактной сварке глубокие вмятины от электродов на поверхности деталей возникают при завышении тока, времени его протекания и давления на электродах, перекосе деталей и плохой подготовке электродов (контактная поверхность не является плоской).

Наконец, к числу дефектов относят и потерю специальных свойств, т. е. свойств, определяющих эксплуатационную надежность данной сварной конструкции (например, коррозионной стойкости, теплостойкости, жаропрочности и других свойств). В данном случае важен правильный выбор сварочных материалов, способа и режима сварки.

2.4.2. Методы контроля качества сварных соединений

Качество сварных соединений оценивают предварительным контролем заготовок, текущим контролем за процессом сварки и приемочным контролем сварных соединений.

Для исследования свариваемости, как правило, применяют сварные образцы специальной конструкции или образцы с имитацией сварочных циклов.

В результате испытания сварных образцов определяют условия появления дефектов, механические и специальные свойства соединений.

Используют как экспериментальные, так и расчетные методы определения показателей свариваемости, причем в каждом конкретном случае основные показатели выбирают с учетом наиболее частых отказов сварных соединений при эксплуатации.

Внешний осмотр сварных соединений позволяет оценить их качество, выявить наличие прожогов, трещин и других внешних дефектов (рис. 2.55).

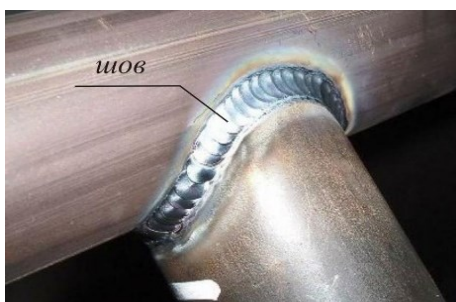


Рис. 2.55. Внешний вид сварного соединения

Деформацию можно определить с помощью измерительных приборов, например, линейки.

В зависимости от нарушения целостности соединения при контроле различают разрушающие и неразрушающие методы контроля. Первый подразумевает разрушение опытного образца, полученного в результате соединения двух деталей. Второй допускает проверку без разрушения.

Разрушающие испытания проводят обычно на образцах-свидетелях, моделях и реже на самих изделиях. Образцы-свидетели изготавливают из того же материала и по той же технологии, что и сварные соединения изделий. Механические испытания соединений и металла шва проводят на растяжение, изгиб, отрыв, сплющивание, и т. п. Сварку считают качественной, если *при испытаниях на отрыв* разрушение происходит по основному металлу. По характеру нагрузки различают статические, динамические и усталостные испытания. Методы разрушающего контроля, как правило, позволяют получить численные данные, характеризующие механические свойства соединений.

Неразрушающие испытания осуществляют обычно на самих изделиях, при этом оценивают физические свойства, которые косвенно характеризуют качество изделий. В зависимости от характера физических полей или движущихся масс, взаимодействующих с контролируемым объектом, обычно используют пять основных видов неразрушающего контроля сварных соединений: радиационный, акустический (ультразвуковой), магнитный, капиллярный и течеискателем. Для ответственных соединений применяют рентгенографический контроль.

Для соединений, полученных сваркой трением с перемешиванием, применяют оптический контроль и аудиометрическое исследование, позволяющие определить наличие пор и неоднородных включений, ухудшающих характеристики шва.

Химический анализ используется для отбраковки материалов по составу и установления причин появления дефектов в сварном соединении. При исследовании соединения обычно производят химический анализ основного, присадочного (электродов и проволоки) и наплавленного металлов шва.

При анализе состава металла шва проверяют соответствие содержания в нем углерода, кремния, марганца и легирующих элементов значениям, рекомендуемым для различных способов сварки, марок электродов, составов основного металла и т. д. Кроме того, необходимо контролировать содержание вредных элементов (серы, фосфора и др.) в допустимых пределах. В некоторых случаях, например, при разработке новых составов покрытия или технологии сварки, выполняют также анализ металла шва на содержание азота, кислорода и водорода.

Пробы для химического анализа отбирают в виде стружки в соответствии с ГОСТ 7122–81 с таким расчетом, чтобы в них содержалось небольшое количество основного металла. Иногда стружку получают из образцов, предназначенных для механических испытаний.

Необходимая для анализа масса стружки зависит от числа проверяемых химических элементов: для определения углерода достаточно 3–5 г стружки, для определения азота и кислорода – 50–60 г, а для полного анализа состава – 50 г.

Если полученные результаты сомнительны, то производят повторный отбор не менее двух проб.

В тех случаях, когда отбор проб затруднен, химический состав сварных швов определяют с помощью спектрального анализа, выполняемого на специальных приборах – спектрометрах, позволяющих с высокой точностью установить количественный состав элементов, входящих в металл шва.

Микроструктуру (строение металлов и сплавов, выявленное с помощью микроскопа) обычно изучают методами оптической и сканирующей электронной микроскопии (рис. 2.56) на специально подготовленных образцах (шлифах).

При оценке специальных свойств сварного соединения используют такие показатели, как скорость коррозии, механические, физические, электрохимические и другие свойства, а при оценке стойкости к разрушению – время или число циклов нагрузки до растрескивания, пороговые напряжения, коэффициенты интенсивности напряжений и т. д.

В связи с повышенной чувствительностью сварных соединений к разрушению в агрессивных средах особое значение приобретает оценка их надежности при работе в этих условиях.

Количественная оценка надежности сварных соединений и конструкций производится с учетом их особенностей двумя способами:

- по классической схеме, являющейся универсальной, т. е. на основе статистической обработки эксплуатационных наблюдений и результатов натурных и стендовых испытаний;

- по результатам сравнительных испытаний образцов из основного металла, надежность которого условно принимается за единицу, и сварных соединений, используемых для оценки предельных состояний материалов (прочности, стойкости к растрескиванию, допустимой глубины коррозии и др.).

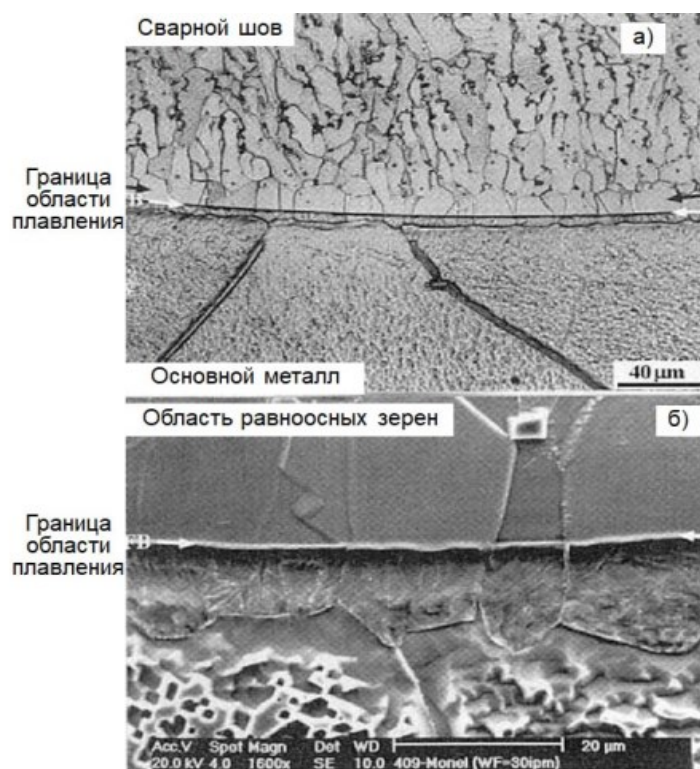


Рис. 2.56. Микроструктура у границы области плавления при сварке ферритной нержавеющей стали:

a – оптическая микрофотография; *б* – сканирующая электронная микрофотография; светлая стрелка – граница плавления; черная стрелка – новые равноосные зерна у границы плавления

При оценке коррозионной стойкости сплавов и средств противокоррозионной защиты важно правильно выбрать показатели коррозии, отражающие эксплуатационно-коррозионную стойкость сплава. Методы испытаний необходимо разрабатывать и выбирать отдельно для каждой группы сплавов.

Для оценки эксплуатационной коррозионной прочности проводятся сравнительные испытания сварных соединений и основного металла в ненапряженном и напряженном состояниях. В целях экономии времени испытания в ненапряженном и напряженном состояниях целесообразно проводить параллельно.

Различают ускоренные испытания в специальных средах для выполнения сравнительного анализа и испытания в производственных средах. Последние обеспечивают непосредственное получение данных о коррозионной стойкости, но не позволяют в связи с продолжительностью процесса оперативно оценивать влияние тех или иных конструктивных и технологических факторов, поэтому на практике широко используют ускоренные методы коррозионных испытаний.

Метод и режимы испытания должны обеспечивать протекание процесса с повышенной скоростью, но при этом не следует чрезмерно ускорять процессы коррозии, так как это усложняет получение сравнительных результатов.

Следует отметить, что перечисленные методы не являются универсальными. Поэтому важно в каждом конкретном случае не только правильно выбирать методы контроля, но и комбинировать разрушающие и неразрушающие методы испытаний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сегодня невозможно представить себе производство судов, турбин, котлов, самолетов, мостов, реакторов, высотных зданий и других конструкций без сварки. С помощью сварки соединяют между собой однородные и разнородные металлы, их сплавы, керамические материалы и пластмассы.

К числу современных трендов относится сокращение объемов применения оборудования и технологии газовой сварки и увеличение объема работ, выполняемых электронно-лучевой, диффузионной сваркой, сваркой токами высокой частоты. Активно разрабатываются и используются новые способы сварки (сварка с применением инфракрасного излучения, сварка под водой, экструзионная сварка, синхронизированная (тандемная) сварка (технология, позволяющая производить сварку сложной конструкции двум сварщикам одновременно), гибридные способы сварки и др.).

Расширяется и спектр свариваемых материалов. В производство успешно внедряются технологии сварки полимерных и композитных материалов.

К числу современных тенденций развития относится совершенствование сварочного оборудования и систем управления сварочных процессов, создание гибких модулей и автоматизация сварочных процессов. Важным моментом является разработка процессов роботизированной сварки крупногабаритных и сложных элементов единого сооружения (магистраль, объекты промышленности и пр.). Осуществляется поиск способов удешевления методов лучевой сварки. Развиваются средства диагностики сварных швов.

Сварка по праву считается ключевой технологией, которая применяется практически во всех сферах и отраслях экономики (тяжелое машиностроение, автомобильная и авиационная промышленность, энергетика, судостроение, промышленное и гражданское строительство и др.), активно развивается и совершенствуется.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Михайлицын, С. В. Основы сварочного производства: учебник / С. В. Михайлицын, М. А. Шекшеев. – М., Вологда : Инфра-Инженерия, 2019. – 260 с.
2. Сварочные процессы и оборудование: учебное пособие / В. А. Ленивкин [и др.]; под ред. В. А. Ленивкина. – М., Вологда : Инфра-Инженерия, 2020. – 388 с.
3. Куликов, В. П. Технология сварки плавлением и термической резки: учебное пособие / В. П. Куликов. – М., Вологда : Инфра-Инженерия, 2021. – 388 с.
4. Сварка. Введение в специальность / В. А. Фролов, В. В. Пешков, А. Б. Коломенский, В. А. Казаков. – М. : Альфа-М, 2013. – 384 с.
5. Васильев, В. И. Введение в основы сварки: учебное пособие / В. И. Васильев. – Томск : ТПУ, 2011. – 317 с.
6. Маслов, В. И. Сварочные работы: учебник / В. И. Маслов. – М. : Издательский центр «Академия», 2012. – 288 с.
7. Теория сварочных процессов: учебник для вузов / А. В. Коновалов, А. С. Куркин, Э. Л. Макаров [и др.]; под ред. В. М. Неровного. – М. : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2007. – 752 с.
8. Электродуговая и газовая сварка: учебное пособие / В. Х. Гаспарян, Л. С. Денисов. – Мн. : Выш. шк., 2013. – 302 с.
9. Смирнов, И. В. Сварка специальных сталей и сплавов : учебное пособие для СПО / И. В. Смирнов – 2-е изд., стер. – СПб. : Лань, 2022. – 268 с.
10. Зорин, Н. Е. Материаловедение сварки. Сварка плавлением : учебное пособие для СПО / Н. Е. Смирнов, Е. Е. Смирнов. – 2-е изд., стер. – СПб. : Лань, 2022. – 164 с.
11. Сидоров, В. П. Расчет параметров сварки плавлением : учебное пособие / В. П. Сидоров. – М., Вологда : Инфра-Инженерия, 2022. – 216 с.
12. Овчинников, В. В. Контроль качества сварных швов и соединений: учебник / В. В. Овчинников. – М., Вологда : Инфра-Инженерия, 2022. – 208 с.
13. Овчинников, В. В. Технология и оборудование для контактной сварки / В. В. Овчинников, М. А. Гуреева. – М., Вологда : Инфра-Инженерия, 2022. – 272 с.
14. Овчинников, В. В. Термитная сварка : учебник / В. В. Овчинников. – М. : КНОРУС, 2019. – 134 с.
15. История развития сварочной техники и технологии: учебное пособие / авт.-сост. К. И. Томас, Юргинский технологический институт. – Томск : Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 213 с.
16. Lippold, J. C. Welding Metallurgy and Weldability / J. C. Lippold. – Wiley, 2014. – 424 p.
17. Kou, Sindo Welding Metallurgy. Second Edition / Sindo Kou. – John Wiley & Sons, Inc., 2003. – 461 p.
18. Ковалев, Я. Н. Основы обучения в техническом университете: учебно-методическое пособие / Я. Н. Ковалев, И. И. Леонович. – Мн. : БНТУ, 2007. – 69 с.
19. Современное инженерное образование : учеб. пособие / А. И. Боровков [и др.]. – СПб. : Изд-во Санкт-Петербургского политехн. ун-та, 2012. – 80 с.

20. Введение в специальность: учеб. пособие для студентов высших учебных заведений / Д. М. Кукуй, Р. Л. Тофпенец, Ф. И. Рудницкий. – Мн. : ИВЦ Минфина, 2011. – 272 с.
21. Люшинский, А. В. Специальные методы сварки: учебник / А. В. Люшинский. – М. : КНОРУС, 2020. – 332 с.
22. Сварка металлов. Термины и определения основных понятий: ГОСТ 2601-84. – Введ. 01.07.1985. – М. : Издательство стандартов, 1984. – 55 с.
23. Сварка металлов. Классификация: ГОСТ 19521-74. – Введ. 01.01.1975. – М. : Государственный комитет стандартов Совета Министров СССР, 1978. – 11 с.
24. Сварные соединения. Методы определения механических свойств: ГОСТ 6996-66. – Введ. 01.01.1967. – М. : Стандартиформ, 2006. – 44 с.
25. Единая система конструкторской документации. Условные изображения и обозначения швов сварных соединений: ГОСТ 2.312-72. – Взамен ГОСТ 2.312-68; введ. 01.01.1973. – М. : Стандартиформ, 2010. – 9 с.
26. Соединения сварные. Методы контроля качества: ГОСТ 3242-79. – Взамен ГОСТ 3242-69; введ. 01.01.1981. – М. : Издательство стандартов, 1979. – 9 с.
27. Сварка. Термины многоязычные для сварных соединений: ГОСТ Р ИСО 17659-2009. – Введ. 01.07.2010. – М. : Стандартиформ, 2010. – 36 с.
28. Сварка и родственные процессы. Словарь. Часть 1. Процессы сварки металлов. Термины и определения: ГОСТ Р ИСО 857-1-2009. – Введ. 01.07.2010. – М. : Стандартиформ, 2010. – 49 с.
29. Материалы сварочные. Газы и газовые смеси для сварки плавлением и родственных процессов: ГОСТ Р ИСО 14175-2010. – Введ. 01.01.2012. – М. : Стандартиформ, 2011. – 10 с.
30. Сварка и родственные процессы. Перечень и условные обозначения процессов: ГОСТ Р ИСО 4063-2010. – Введ. 01.01.2012. – М. : Стандартиформ, 2011. – 11 с.
31. Сварка и родственные процессы. Классификация дефектов геометрии и сплошности в металлических материалах. Часть 1. Сварка плавлением: ГОСТ Р ИСО 6520-1-2012. – Введ. 01.01.2014. – М. : Стандартиформ, 2014. – 31 с.
32. Интеллектуальная собственность. Патентные исследования. Содержание и порядок проведения: ГОСТ Р 15.011-2024. – Введ. 01.03.2024. – М. : Российский институт стандартизации, 2024. – 24 с.

Учебное издание

ВВЕДЕНИЕ В ИНЖЕНЕРНОЕ ОБРАЗОВАНИЕ (СВАРКА)

Учебно-методическое пособие
для обучающихся по специальности
6-05-0714-03 «Инженерно-техническое проектирование
и производство материалов и изделий из них» профилизации
«Оборудование и технология сварочного производства»

С о с т а в и т е л и:
ПАНТЕЛЕЕНКО Фёдор Иванович
ТАЛАКО Татьяна Леонидовна
ПОПОВ Ростислав Юрьевич
ФИЛИППОВ Максим Николаевич

Редактор *К. С. Мельникова*
Компьютерная верстка *А. В. Степанкиной*

Подписано в печать 29.12.2025. Формат 60×84 ¹/₈. Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 14,07. Уч.-изд. л. 8,15. Тираж 50. Заказ 214.

Издатель и полиграфическое исполнение: Белорусский национальный технический университет.
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя, распространителя
печатных изданий № 1/173 от 12.02.2014. Пр. Независимости, 65. 220013, г. Минск.