

Федеральное агентство железнодорожного транспорта
Петербургский государственный университет путей сообщения
Императора Александра I

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ. ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ (СВАРОЧНОЕ ПРОИЗВОДСТВО)

Учебное пособие

Казань
Издательство «Бук»
2024

УДК 621.01(076)

ББК 34.41я73

М34

Авторы:

А. А. Воробьёв, Н. А. Битюцкий, И. Ю. Новосельский, А. А. Соболев

Рецензенты:

Иванов Игорь Александрович, доктор технических наук, профессор
(Петербургский государственный университет путей сообщения Императора Александра I)
Овелян Артём Апетнакович, кандидат технических наук, генеральный директор
(ОАО «Тверской вагоностроительный завод»)

М34 **Материаловедение. Технология конструкционных материалов** (сварочное производство) : учебное пособие / [А. А. Воробьёв, Н. А. Битюцкий, И. Ю. Новосельский, А. А. Соболев]; Федер. агентство ж.-д. трансп., Петербургский гос. ун-т путей сообщения Имп. Александра I. — Казань : Бук, 2024. — 54 с. — Текст : непосредственный.

ISBN 978-5-907753-97-6.

В издании приводятся указания для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Материаловедение. Технология конструкционных материалов», «Материаловедение и технология конструкционных материалов» и «Технология конструкционных материалов» (раздел «Сварка»).

Пособие предназначено для подготовки к лабораторным работам, практическим занятиям и как лекционный материал для обучающихся всех форм обучения по укрупненной группе 23.00.00 «Техника и технологии наземного транспорта», а именно для специальности 23.05.03 «Подвижной состав железных дорог» (специализаций: «Пассажирские вагоны», «Грузовые вагоны», «Высокоскоростной наземный транспорт», «Электрический транспорт железных дорог», «Технология производства и ремонта подвижного состава», «Локомотивы», «Вагоны»), специальности 23.05.01 «Наземные транспортно-технологические средства», (специализация «Подъемно-транспортные, строительные, дорожные средства и оборудование»), направления 23.03.03 «Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов» профиль «Автомобильный сервис», 23.04.02 «Наземные транспортно-технологические комплексы» магистерская программа: «Производство и ремонт транспортно-технологических комплексов» и др. специализаций, направлений, профилей и программ.

УДК 621.01(076)

ББК 34.41я73

ISBN 978-5-907753-97-6

© Воробьёв А. А., Битюцкий Н. А.,
Новосельский И. Ю., Соболев А. А., 2024
© Оформление. ООО «Бук», 2024

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	5
1. ХАРАКТЕРИСТИКА СПОСОБОВ СВАРКИ И СХЕМАТИЗАЦИЯ СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ.....	7
1.1. Классификация и технологические характеристики различных способов сварки.....	7
2. СПОСОБЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ СВАРКИ.....	14
2.1. Ручная дуговая сварка.....	14
2.2. Автоматическая дуговая сварка под флюсом.....	22
2.3. Сварка в защитных газах.....	25
2.4. Плазменная сварка и резка.....	28
2.5. Электрошлаковая сварка.....	31
2.6. Газовая сварка.....	33
3. ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ СВАРКИ.....	39
3.1. Электрическая контактная стыковая сварка.....	39
3.2. Электрическая контактная точечная сварка.....	43
3.3. Электрическая контактная шовная сварка.....	45
3.4. Конденсаторная сварка.....	47
3.5. Сварка трением.....	49
3.6. Ультразвуковая сварка.....	51
Библиографический список.....	52

ВВЕДЕНИЕ

Целью изучения дисциплин «Материаловедение. Технология конструкционных материалов», «Материаловедение и технология конструкционных материалов» и «Технология конструкционных материалов» является ознакомление обучающихся с конструкционными материалами, сплавами и их свойствами, теоретическими и технологическими основами производства различных материалов, методами получения из них заготовок и деталей машин.

Задачи дисциплин:

- изучение физической сущности явлений, происходящих в материалах при воздействии на них различных факторов в условиях производства и эксплуатации и их влияния на свойства материалов;
- установление зависимостей между составом, строением и свойствами материалов;
- изучение теории и практики различных способов упрочнения материалов, обеспечивающих высокую надежность и долговечность деталей машин, инструмента и других изделий;
- изучение основных групп металлических и неметаллических материалов, их свойств и области применения;
- получение представлений о способах производства материалов;
- изучение основных сведений о технологических процессах литья, обработки давлением, сварки и пайки, обработки резанием, их принципиальных схемах, применяемом оборудовании и инструментах;
- освоение принципов выбора методов изготовления заготовок и деталей машин в зависимости от их материала, условий работы и особенностей конструкции и других факторов, включая экономические.

Обучающийся должен быть способен принимать решения в области профессиональной деятельности, применяя нормативную правовую базу, теоретические основы и опыт производства и эксплуатации транспорта; знать особенности и характеристики конструкционных материалов и технологий, применяемых при производстве подвижного состава железных дорог.

Данное издание посвящено изучению одного из разделов этих дисциплин — сварке и сварочному производству. Рассмотрено классификация и технологические характеристики различных способов сварки, способы термической сварки (ручная дуговая сварка, автоматическая дуговая сварка под флюсом, сварка в защитных газах, плазменная сварка, электрошлаковая сварка, газовая сварка), термомеханические способы сварки, электрическая контактная точечная сварка, электрическая контактная шовная сварка, конденсаторная сварка, сварка трением и ультразвуковая сварка.

1. ХАРАКТЕРИСТИКА СПОСОБОВ СВАРКИ И СХЕМАТИЗАЦИЯ СВАРОЧНЫХ ПРОЦЕССОВ

1.1. Классификация и технологические характеристики различных способов сварки

Сваркой называют образование неразъемного соединения заготовок или деталей машин путем их местного сплавления, совместного деформирования, сдавливания, в результате чего возникают прочные связи между атомами (молекулами) соединяемых тел.

Основные физические процессы, лежащие в основе различных способов сварки, заключаются:

- в местном расплавлении материала свариваемых заготовок (деталей) и последующем сплавлении, кристаллизации расплавленного металла с образованием общих для соединяемых заготовок кристаллических решеток;
- в создании условий, благоприятных для адгезии (схватывания) поверхностей свариваемых заготовок путем очищения контактируемых поверхностей от оксидов, загрязнений, нагрева и совместного пластического деформирования;
- в создании условий, благоприятных для взаимной диффузии атомов в поверхностных слоях контактирующих материалов, находящихся в твердом состоянии;
- в объединении частей молекулярных цепей при сварке пластмасс.

Сваркой соединяют однородные и разнородные металлы и их сплавы, металлы с некоторыми неметаллическими материалами (керамикой, графитом, стеклом и др.), а также пластмассы.

Существует свыше 60 различных способов сварки, отличающихся друг от друга способами нагрева заготовок, источниками энергии, наличием или отсутствием расплавления материала свариваемых заготовок, применением присадочных материалов или плавящихся электродов, совместного пластического деформирования, диффузии и т. д. Классифицируют различные способы сварки по большому числу признаков.

С учетом природы физических процессов, обеспечивающих получение неразъемных соединений, различные способы сварки принято

подразделять на две основные группы: *термические* (или способы сварки плавлением) и *термомеханические*, сочетающие применение нагрева заготовок с механическим воздействием (давлением).

Кроме того, существует *холодная* или *механическая сварка*, при которой неразъемные соединения получают местной пластической деформацией без предварительного нагрева заготовок (рис. 1). Данный вид сварки применяется для пластичных металлов (алюминия, меди, кадмия, свинца, золота, серебра, цинка), так как благоприятные условия для образования неразъемного соединения проявляются уже при комнатной температуре окружающей среды.

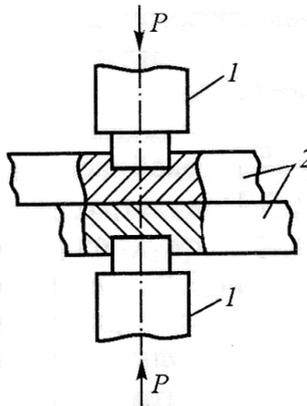


Рис. 1. Схема холодной сварки:
1 — пуансоны; 2 — свариваемые заготовки

К *термическому классу* относятся способы сварки, осуществляемые плавлением с использованием различного вида энергии.

Существующие виды термической сварки могут быть классифицированы по виду источников теплоты, способы сварки — по типу защиты ванны и свариваемого металла от взаимодействия с атмосферой воздуха, особенности введения теплоты, степени автоматизации процессов и другим признакам. По виду источника теплоты могут быть выделены способы сварки плавлением: дуговая, электрошлаковая, электронно-лучевая, лазерная, свето-лучевая, газовая, плазменная и термитная.

По виду защиты свариваемого металла и сварочной ванны от окружающей атмосферы могут быть выделены способы сварки со шлаковой, газшлаковой и газовой защитой.

По материалу и функциональному назначению электродов различают сварку плавящимся и неплавящимся электродом.

По роду применяемого электрического тока — сварка на постоянном или переменном токе, при непрерывной подаче тока или импульсами тока; в зависимости от знаков электрического заряда на электродах при постоянном токе: при прямой и обратной полярности.

В зависимости от формы сварного соединения различают: стыковую, точечную и шовную сварку.

По степени автоматизации процесса существующие способы сварки могут быть разделены на ручную, полуавтоматическую и автоматическую.

Термомеханическая сварка основана на сближении свариваемых поверхностей до образования межатомных связей путем схватывания (адгезии) или путем диффузии. Для возникновения адгезионных связей необходимы высокие значения давления, повышенные гомологические температуры, а также отсутствие оксидных пленок, наличие чистых поверхностей контактирующих металлов (материалов). Поскольку для такого сближения контактируемых поверхностей и создания высоких давлений необходимы большие удельные силы, в месте адгезионного соединения поверхностей свариваемых заготовок обычно происходит пластическая деформация.

При сварке металл нагревают при помощи источников тепла, распределенных различным образом по поверхности или по объему свариваемых заготовок. При сварке плавлением источники тепла должны проплавить кромки основного металла, расплавить в нужном количестве присадочный металл или металл электрода, образовать жидкую металлическую ванну. Для осуществления сварки в пластическом состоянии достаточно нагреть сдавливаемые участки поверхности металла до температуры, меньшей температуры плавления.

Как при сварке плавлением, так и при сварке в пластическом состоянии поверхности свариваемых частей металла готовят к осуществлению атомной или молекулярной связи путем местного нагрева до температуры, либо превышающей температуру плавления, либо несколько меньшей этой температуры.

При различных видах сварки используются разнообразныe источники тепловой энергии: электрическая сварочная дуга (прямого или косвенного действия); струя разогретого до высоких температур газа, пропускаемого через электрическую дугу или совмещенную с электрической дугой; теплота, образующаяся при прохождении электрического тока через расплавленную шлаковую ванну, через контакт свариваемых деталей, обладающий электрическим сопротивлением; трение контактирующих поверхностей свариваемых деталей; теплота от электрических вихревых токов, наводимых в проводнике переменным магнитным полем или теплота, выделяющаяся в металле за счет местного повышенного электрического сопротивления; электронный луч; лазерный луч; энергия удара и тепловая энергия, образующаяся при сгорании (детонации) взрывчатых веществ; пламя горючих газов, сгорающих в струе чистого кислорода и др.

Различают способы сварки неплавящимся (вольфрамовым или угольным) или плавящимся (металлическим) электродом, расплавлением только основного металла 3 либо с применением присадочного металла 4 или металла плавящегося электрода, дугой, горячей между электродом и заготовкой, между двумя неплавящимися электродами (косвенной дугой), трехфазной дугой, горячей между двумя электродами и заготовкой (рис. 2).

Практически все основные виды дуговой сварки: плавящимся и неплавящимся электродом, ручная, полуавтоматическая и автома-

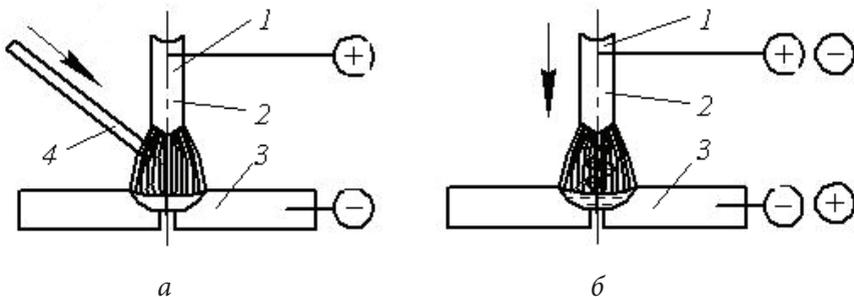


Рис. 2. Схемы дуговой сварки: а — сварка неплавящимся электродом; б — сварка плавящимся электродом: (1 — электрод, 2 — электрическая дуга, 3 — свариваемая деталь, 4 — присадочный материал)

тическая, незащищенной дугой и в среде защитного газа предложил и осуществил Н. Н. Бернардос в 1880–1890 гг.

Им же в 1887 г. изобретены основные способы контактной (термомеханической) электросварки — точечной и шовной, при которых кратковременный нагрев места соединения без оплавления или с оплавлением сочетается с осадкой свариваемых заготовок.

В конце 1880-х гг. Н. Г. Славянов осуществил и широко внедрил сварку плавящимся металлическим электродом, разработал основы металлургии сварочного процесса и, в частности, предложил вести сварку под шлаковой защитой, под флюсом.

Прочность сварного шва, образующегося при термической сварке, обычно ниже, чем у основного металла. Это связано частично с тем, что в качестве присадочных материалов или плавящихся электродов, как правило, используют материалы, менее легированные, чем основной металл. Качество сварного шва нередко снижается из-за насыщения расплавленного металла атмосферными газами. В некоторой области заготовок, непосредственно прилегающей к сварному шву, зачастую возникают высокие и быстроизменяющиеся температуры, вызывающие в материале структурные изменения: укрупнение зерен, оплавление границ зерен, образование микроструктуры закалочного типа и т.д. Эту область материала называют зоной термического влияния (рис. 3).

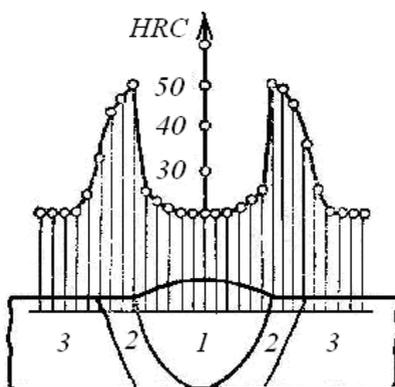


Рис. 3. Распределение твердости после термической сварки стали 40ХФА:

- 1 — сварной шов; 2 — зона термического влияния;
- 3 — основной материал свариваемых заготовок

Неравномерный местный нагрев заготовок вызывает в них термические деформации, а после остывания — термические напряжения. Термические деформации и напряжения при сварке могут вызвать образование и развитие горячих и холодных трещин (рис. 4).

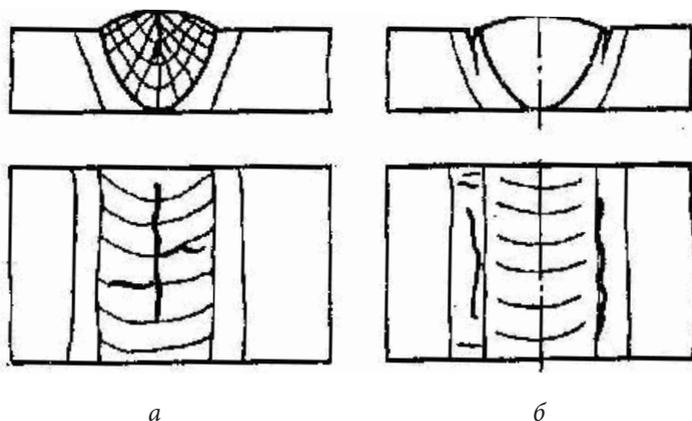


Рис. 4. Трещины в сварных соединениях:
а — горячие в шве; б — холодные в зоне термического влияния

Быстрое охлаждение металла сварного шва при насыщении его газами способно привести к повышенной пористости металла из-за затрудненного выхода пузырьков газа при кристаллизации металла в атмосферу.

Основной технологической характеристикой процесса является *свариваемость* — свойство металла (или сочетания металлов) образовывать при установленной технологии сварки соединения, отвечающее конструктивным и эксплуатационным требованиям.

Хорошей свариваемостью обладают низкоуглеродистые и низколегированные стали.

Углеродистые стали с содержанием углерода более 0,3% (например, сталь 45) и легированные стали (30ХГСА, 40ХНМА и др.) при типовых режимах сварки закаляются в зоне термического влияния. Для устранения этого явления разрабатывают специальные технологические мероприятия, обеспечивающие более благоприятный температурный режим.

При сварке аустенитных высоколегированных коррозионно-стойких сталей, содержащих более 12% *Cr* и 8% *Ni* возможно обеднение приграничных участков зерен хромом, следствием чего может быть возникновение межкристаллитной коррозии. Более медленное охлаждение менее теплопроводных аустенитных сталей может привести к крупнозернистости, к образованию горячих трещин. Для устранения этих недостатков в сварочные материалы вводят необходимые легирующие элементы, способствующие измельчению зерен.

При сварке чугуна металл шва получает структуру белого чугуна, а зона термического влияния закаливается. Для устранения этих недостатков свариваемые заготовки перед сваркой предварительно подогревают.

При сварке меди и ее сплавов в связи с их высокой теплопроводностью применяют предварительный подогрев заготовок, повышенные мощности тепловых источников.

Проблемы, возникающие при сварке алюминия и его сплавов, связаны с образованием тонкой прочной и тугоплавкой ($\theta_{пл} = 2050^\circ\text{C}$) поверхностной пленки оксида Al_2O_3 , а также склонностью к образованию горячих трещин и газовой пористости. Проблемы насыщения расплавленного металла газами (кислородом, водородом, азотом) актуальны при сварке титана, циркония, молибдена, ниобия и их сплавов. Для устранения этих недостатков сварку ведут в атмосфере защитных газов.

2. СПОСОБЫ ТЕРМИЧЕСКОЙ СВАРКИ

2.1. Ручная дуговая сварка

Электрическая сварочная дуга (вольтова дуга) представляет собой устойчивый электрический разряд в сильно ионизированной газовой среде между двумя электродами. Разрядные явления сосредоточены в светящемся плазменном столбе. При горизонтальном расположении электродов светящийся плазменный столб под воздействием восходящих потоков нагретого разрядом газа принимает форму дуги.

Температура плазмы в столбе электрической дуги около 5000–6000 °С. При обдувании плазменного столба потоком газа температура плазмы еще выше.

При дуговой сварке электрическая дуга (рис. 5) находится между электродом и свариваемой заготовкой, которые подключены к выходным клеммам источника тока.

Питание дуги может осуществляться постоянным или переменным током. При применении постоянного тока полярность, при которой электрод служит отрицательным полюсом (катодом), а заготовка — положительным (анодом), называют *прямой*. Если же электрод является анодом, а заготовка — катодом, то полярность называют *обратной*.

Падение напряжения распределено неравномерно по длине дуги (рис. 5). Наибольшие местные падения напряжения наблюдаются у катодного и анодного пятен. Поэтому именно в области этих пятен сосредоточена основная часть выделяемого дугой тепла. Анодное и катодное пятна дуги нагреваются до температуры, приближающейся к температуре испарения материала электрода. На стальном электроде эта температура составляет около 2100–2300 °С.

При возникновении электрического разряда (при зажигании дуги) увеличение тока сопровождается уменьшением напряжения между электродами. При увеличении тока эта зависимость стабилизируется (рис. 6, а), а при очень больших токах даже возрастает (рис. 6, б).

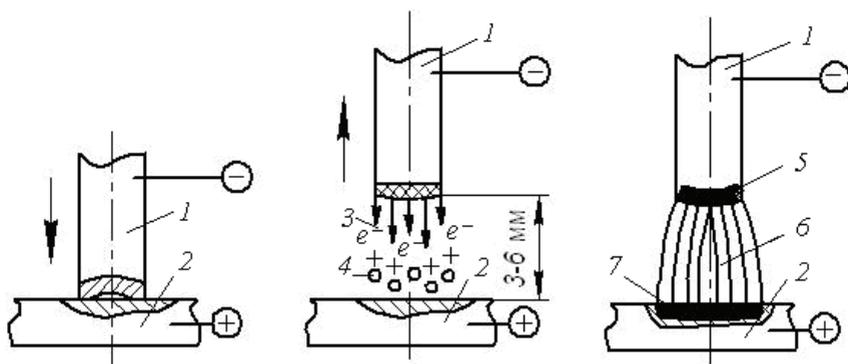


Рис. 7. Схема зажигания электрической дуги: а — короткое замыкание; б — ионизация воздушного промежутка за счет эмиссии электронов; в-устойчивый дуговой разряд: (1 — электрод; 2 — заготовка; 3 — поток электронов; 4 — поток положительно заряженных ионов; 5 — катодное пятно; 6 — дуга; 7 — анодное пятно)

Рассмотрим различные стадии процесса зажигания электрической дуги (рис. 7). Если между электродом и свариваемой заготовкой имеется неионизированный воздушный промежуток, то ток отсутствует. Такой режим работы трансформатора называется *режимом холостого хода*. На рисунке б ему соответствует точка А. При этом напряжением холостого хода на вторичной обмотке трансформатора максимально.

Для ионизации воздушного промежутка необходимо повысить температуру поверхностей анода и катода (электрода и заготовки). Для этого предусмотрен режим *короткого замыкания*. На рисунке б режиму короткого замыкания соответствует точка Д.

В режиме короткого замыкания электрод касается поверхности детали. При этом напряжение падает до минимального значения, а ток возрастает до наибольшего значения — тока короткого замыкания. При прохождении тока через контакт электрода и детали в месте контакта выделяется тепло и поверхности электрода и участка детали нагреваются.

При отрыве электрода от заготовки под действием тепловой энергии ускоряется движение свободных электронов, происходит

эмиссия электронов в газовое пространство, воздушный промежуток ионизируется, его электрическое сопротивление уменьшается, среда становится электропроводной. Возникает неустойчивый слабый электрический разряд. Этому режиму соответствует точка В (см. рис. 6).

Возможно зажигание дуги и без короткого замыкания и отвода электрода. Для этого в сварочную цепь на короткое время подключают источник высокочастотного переменного тока высокого напряжения (осциллятор).

Возникновение электрического разряда также способствует большей ионизации воздушного промежутка и приводит к увеличению тока и уменьшению напряжения, необходимого для устойчивого электрического разряда, то есть для устойчивого горения дуги. Устойчивому горению дуги, то есть рабочему режиму соответствует точка С (см. рис. 6).

Для питания сварочной дуги применяются специальные источники тока, в частности — сварочные трансформаторы, рассчитанные на достаточно большие токи (до 300 А — при ручной дуговой сварке покрытым электродом и до 1000 А — при автоматической дуговой сварке под флюсом) при низких выходных рабочих напряжениях (порядка 20 В). На первичную обмотку трансформатора подается переменный ток напряжением 220 (или 380) В. Со вторичной обмотки, имеющей меньшее число витков, снимается меньшее напряжение.

Сварочные трансформаторы, как правило, имеют падающую внешнюю характеристику и используются для ручной или автоматической дуговой сварки.

Внешнюю вольт-амперную характеристику сварочного трансформатора изменяют с целью обеспечения безопасного напряжения холостого хода трансформатора и регулирования сварочного тока и тока короткого замыкания. Для ручной дуговой сварки покрытым электродом сварочный трансформатор должен иметь крутопадающую в области больших токов вольт-амперную характеристику (2) (см. рис. 6). Это необходимо для ограничения тока короткого замыкания и уменьшения колебания тока при изменении расстояния между электродом и свариваемой заготовкой. В то же время в области малых токов внешняя вольт-амперная характеристика должна быть пологой, стационарной. Это необходимо для ограничения напряже-

ния холостого хода и облегчения возникновения первого электрического разряда.

Наиболее простую схему имеют сварочные трансформаторы с отдельным дросселем, состоящие из понижающего трансформатора 1 и переменного индуктивного сопротивления (дросселя) 2, включенного последовательно в сварочную цепь (рис. 8).

Сварочные агрегаты состоят из двигателя внутреннего сгорания и сварочного генератора постоянного тока. Агрегаты монтируют на подвижных платформах, прицепах и используют в монтажных и полевых условиях для ручной сварки (рис. 9).

Сварочные выпрямители состоят из трехфазного понижающего трансформатора 1, выпрямительного моста 2, собранного из кремниевых полупроводниковых диодов по трехфазной мостовой схеме (рис. 10).

Падающая внешняя характеристика выпрямителя обеспечивается повышенным индуктивным сопротивлением понижающего трансформатора. Плавное регулирование тока достигается перемещением подвижной первичной обмотки. Эта же задача может быть решена заменой в выпрямительном мосте диодов тиристорами, управляемыми путем подачи на них управляющего напряжения от 0 до 10 В.

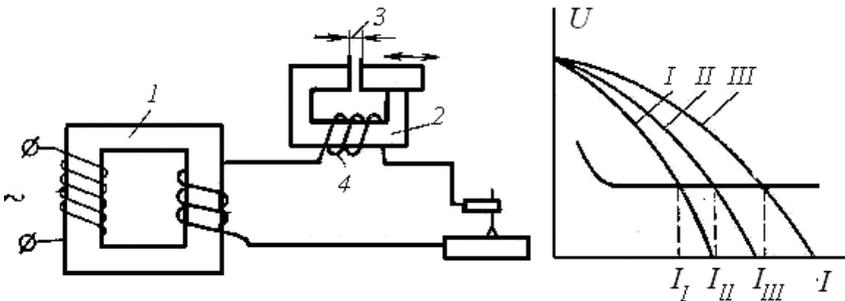


Рис. 8. Схема сварочного трансформатора с последовательно включенным дросселем (а) и три различных падающих характеристики трансформатора и вольтамперная характеристика дуги (б): 1 — понижающий трансформатор, 2 — дроссель, 3 — регулируемый зазор, 4 — катушка индуктивности

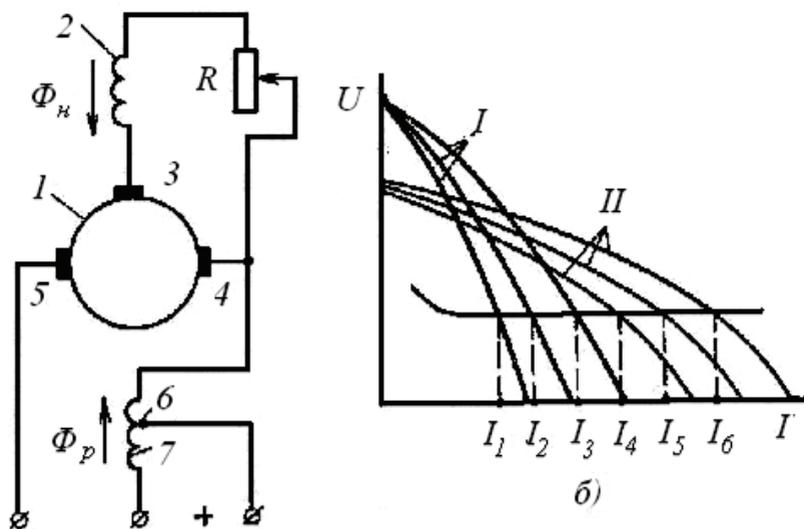


Рис. 9. Схема сварочного генератора с параллельной намагничивающей последовательной размагничивающей обмотками возбуждения (а) и различные сочетания падающих характеристик сварочного генератора и вольт-амперной характеристики дуги (б): (1 — сварочный генератор; 2 — намагничивающая обмотка возбуждения; 3, 4, 5 — контакты; 6 — подвижный контакт размагничивающей обмотки возбуждения; 7 — размагничивающая обмотка возбуждения)

Выпрямители бесшумны, имеют большой КПД, удобны в эксплуатации, обеспечивают высокую стабильность горения дуги и возможность работы с малыми токами.

Ручную дуговую сварку выполняют сварочными электродами, которые вручную подают в дугу и перемещают вдоль сварного шва заготовки (рис. 11).

Электрод 1 перемещают относительно детали вдоль сварного шва с некоторой рациональной скоростью $v_{св}$, вследствие чего жидкие шлаковая и металлическая ванны остывают и переходят в твердое состояние, образуя шлаковую корку 2 и сварной шов 3. По мере плавления электрода для соблюдения рациональной длины дуги электрод подают в направлении заготовки с подачей S.

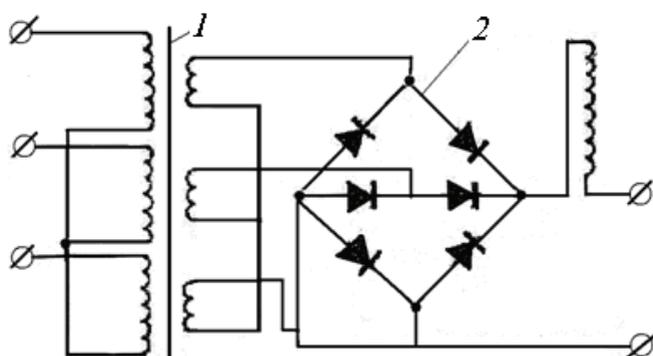


Рис. 10. Схема трехфазного выпрямителя:
1 — понижающий трансформатор; 2 — выпрямительный мост

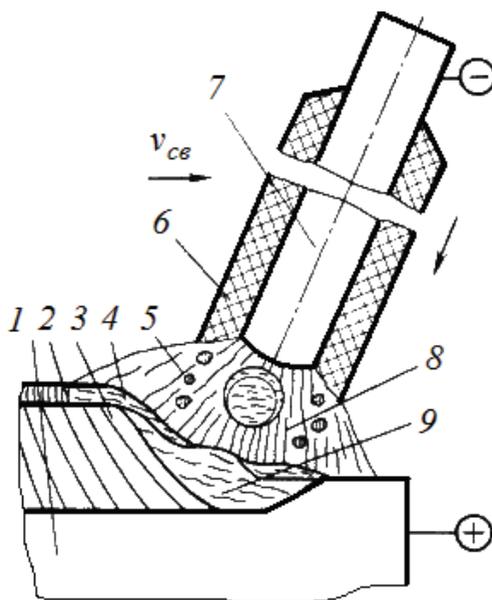


Рис. 11. Схема дуговой сварки: 1 — деталь; 2 — шлаковая корка;
3 — сварной шов; 4 — жидкая шлаковая ванна; 5 — газовая защитная атмосфера; 6 — обмазка (покрытие) электрода; 7 — электрод;
8 — электрическая дуга, 9 — металлическая ванна

Металлические электроды изготавливают из проволоки диаметром от 0,3 до 12 мм. Электрод имеет специальное покрытие 6, облегчающее возникновение электрического разряда и повышающее его устойчивость, а также способствующее возникновению газовой защитной атмосферы 5 на периферии воздушного промежутка между электродом и заготовкой. Для облегчения возникновения электрического дугового разряда и улучшения его стабильности в состав поверхностного покрытия электрода включают химические соединения, имеющие более низкий потенциал ионизации, чем кислород (13,6 эВ) и азот (14,5 эВ), например, калий, имеющий потенциал ионизации 4,3 эВ.

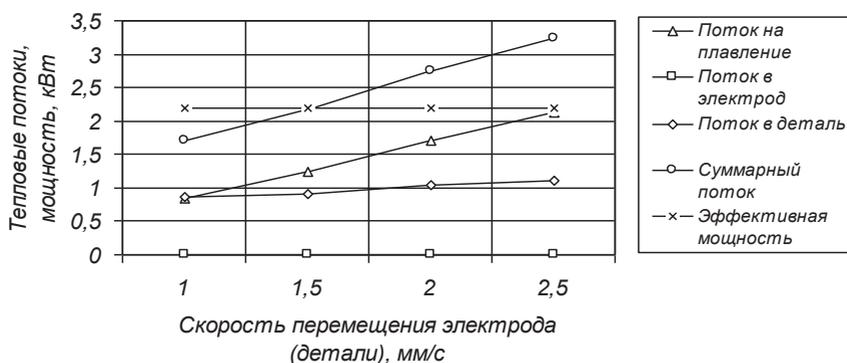
Электрод покрывают обмазкой не только с целью ионизации воздушного промежутка, но и для улучшения качества сварного шва. Для этого в состав обмазки включают легирующие и раскисляющие химические вещества. Расплавленное покрытие электрода образует жидкую шлаковую ванну 4. Капли расплавленного электрода стекают на заготовку и образуют металлическую ванну 9.

Основными составляющими теплового баланса при ручной дуговой сварке являются поток тепла, поглощаемый металлом электрода при его плавлении, и поток тепла, поступающий в деталь (рис. 12).

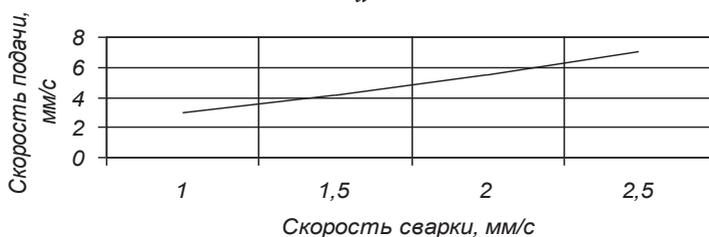
Оптимальная скорость сварки (т. е. скорость перемещения электрода вдоль сварного шва относительно детали) определяется из условия равенства суммы этих потоков и эффективной мощности электрической дуги.

Поток тепла, поступающий в деталь, хотя и неизбежен, но для заполнения сварочного шва не является необходимым. С ростом скорости сварки поток тепла в деталь увеличивается, хотя и значительно медленнее, чем поток тепла, расходуемый на плавление металла, заполняющего шов. Поэтому увеличение скорости сварки благоприятно с точки зрения рационального использования энергии и снижения себестоимости. Однако при ручной сварке увеличение скорости ограничивается рядом факторов: трудностями ручного управления перемещением и подачей электрода, невозможностью существенного увеличения сварочного тока из-за нагрева электрода и отслоения обмазки электрода.

Таким образом, к недостаткам ручной дуговой сварки необходимо отнести невозможность использования больших сварочных токов вследствие разогрева электрода и увеличение разбрызгивания и угара расплавленного металла, насыщение сварного шва газами



а



б

Рис. 12. Баланс тепловых потоков при ручной дуговой сварке (а) и соотношение скоростей перемещения и подачи электрода (б)

из-за непосредственного контакта металлической и лаковой ванн с атмосферой и, как следствие, — низкие производительность сварки и качество сварного шва. Кроме того, ручная дуговая сварка экологически вредна для сварщика и требует его высокой квалификации для регулирования оптимального расстояния между электродом и свариваемой деталью и скорости перемещения дуги.

2.2. Автоматическая дуговая сварка под флюсом

Основными задачами совершенствования электрической дуговой сварки являются повышение качества и надежности сварного соединения, повышение производительности сварки, экономия электро-

энергии, расходуемой на сварку, улучшение экологических условий работы сварщика-оператора.

Эти задачи наиболее эффективно решаются за счет механизации или автоматизации подачи электродной проволоки в зону сварки, а также за счет увеличения сварочных токов. При автоматической дуговой сварке под флюсом перемещение сварочной головки вдоль сварного шва и подача электродной проволоки в зону сварки механизированы (рис. 13).

Слой флюса толщиной 30–50 мм используется для защиты дуги и сварочной ванны от воздуха, для раскисления и легирования расплавленного металла, для повышения устойчивости горения дуги. Благодаря наличию флюса в качестве электрода используется непокрытая электродная проволока, которую автоматически подают в дугу и перемещают вдоль шва с помощью механизмов подачи и перемещения.

Применение непокрытой проволоки позволяет приблизить токопровод на расстояние 30–50 мм от дуги и тем самым уменьшить разогрев электродной проволоки при применении больших токов.

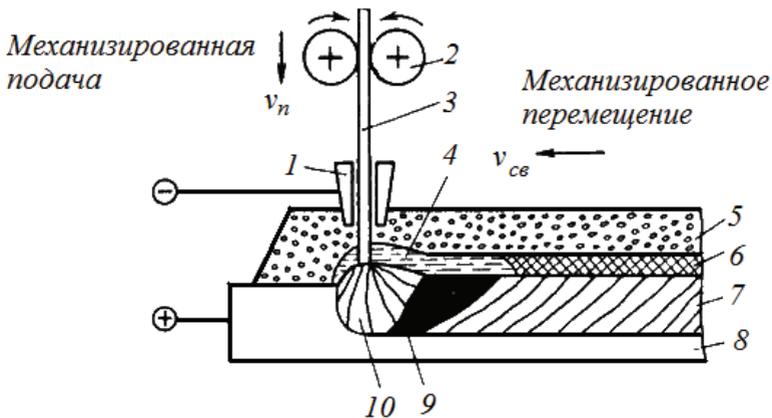
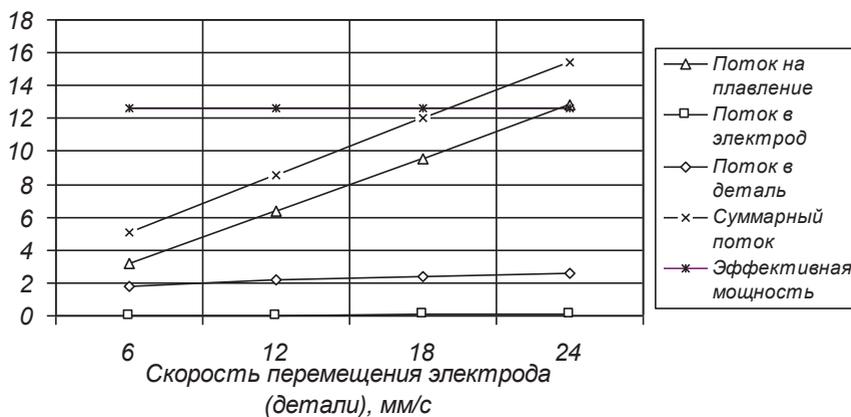


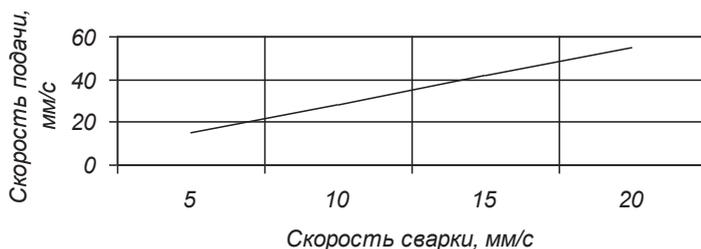
Рис. 13. Схема автоматической дуговой сварки: 1 — токопровод; 2 — механизм подачи; 3 — проволока; 4 — жидкий шлак; 5 — флюс; 6 — шлаковая корка; 7 — сварной шов; 8 — основной металл; 9 — сварочная ванна; 10 — дуга

При автоматической сварке под флюсом дуга 10 горит между электродной проволокой 3 и основным металлом 8. Столб дуги 10 и металлическая ванна жидкого металла 9 со всех сторон плотно закрыты слоем флюса 5. Благодаря этому снижаются потери тепла в окружающую среду, повышается КПД сварки. Часть флюса расплавляется, в результате чего вокруг дуги образуется газовая полость, а на поверхности расплавленного металла — ванна жидкого шлака 4.

Благодаря описанной схеме сварки удается применять повышенные сварочные токи (до 2000 А) и, соответственно, более высокие мощности источника (до 30–40 кВт). При этом внешняя вольтамперная характеристика может быть стационарной.



а



б

Рис. 14. Баланс тепловых потоков при автоматической дуговой сварке (а) и соотношении скоростей перемещения и подачи электрода (б)

При автоматической дуговой сварке под флюсом за один проход возможно сваривать металл большой толщины (до 20 мм) без разделки кромок и значительно увеличивать скорость перемещения дуги относительно

Как показывает анализ результатов расчета (рис. 14, а), при автоматической сварке расход тепла на переплавку электродной проволоки составляет основную часть мощности электрической дуги. Потери тепла на разбрызгивание, отвод в окружающую среду и в электрод теплопроводностью незначительны, а отвод тепла в деталь также существенно ниже, чем при ручной сварке.

При этом существенно увеличивается производительность сварки, значительно уменьшается себестоимость сварочных работ (рис. 14, б).

Автоматическую сварку применяют при изготовлении котлов, резервуаров для хранения жидкостей и газов, корпусов судов, мостовых балок и других изделий. Она является одним из основных звеньев автоматических линий для изготовления сварных автомобильных колес и станков для производства сварных труб.

2.3. Сварка в защитных газах

Для защиты электрода, зоны дуги и сварочной ванны используется не только флюс, но и струя защитного газа. Чаще всего применяют аргон (Ar) или углекислый газ (CO_2).

Аргон — бесцветный инертный газ, в 1,38 раз тяжелее воздуха, не растворим в металлах. Поставляют и хранят Ar в стальных баллонах в сжатом газообразном состоянии под давлением 15 МПа.

Углекислый газ CO_2 — бесцветный, со слабым запахом, в 1,52 раза тяжелее воздуха, не растворим в металлах. Для сварки углекислый газ поставляют и хранят в стальных баллонах в сжиженном состоянии под давлением 7 МПа.

По сравнению с автоматической сваркой под флюсом сварка в атмосфере защитных газов обеспечивает более надежную защиту расплавленного металла от воздействия воздуха, получение чистой поверхности шва без оксидов и шлаковых включений, возможность ведения процесса в любых пространственных положениях и наблю-

дения за процессом формирования сварочного шва. Те же преимущества сварка в защитных газах имеет и перед ручной дуговой сваркой покрытыми электродами, кроме того, она обеспечивает и более высокую производительность.

Аргонодуговая сварка может осуществляться неплавящимся (вольфрамовым) или плавящимся электродами.

Сварка в атмосфере защитных газов может быть ручной, полуавтоматической и автоматической. Аргонодуговую сварку применяют для тугоплавких и цветных металлов, а также легированных и высоколегированных сталей (узлы летательных аппаратов, атомных установок, химических аппаратов и т. п.)

При сварке неплавящимся вольфрамовым электродом (рис. 15) ($T_{пл} = 3370\text{ }^{\circ}\text{C}$) швы до 3 мм получают расплавлением основного металла, а от 3 до 6 мм с применением присадочного материала (прутка

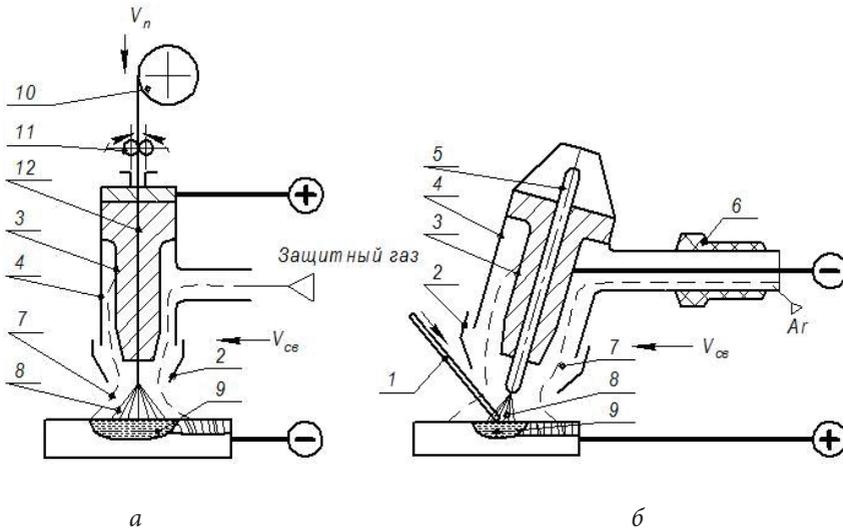


Рис. 15. Схема сварки в защитных газах плавящимся (а) и неплавящимся электродом при прямой полярности с присадочным прутком (б);

1 — присадочный пруток; 2 — сопло; 3 — токопроводящий мундштук;

4 — корпус горелки; 5 — неплавящийся вольфрамовый электрод,

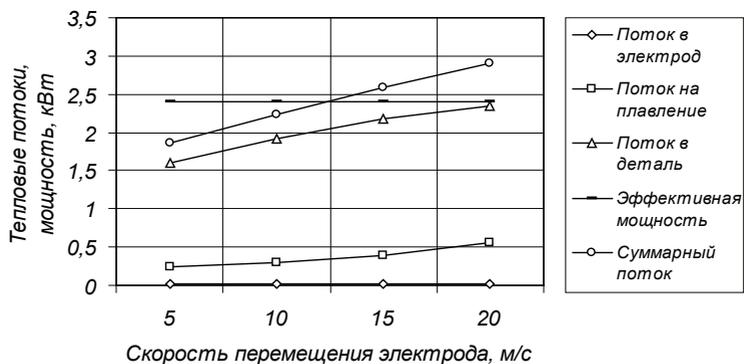
6 — рукоятка горелки; 7 — атмосфера защитного газа; 8 — сварочная дуга;

9 — ванна расплавленного металла

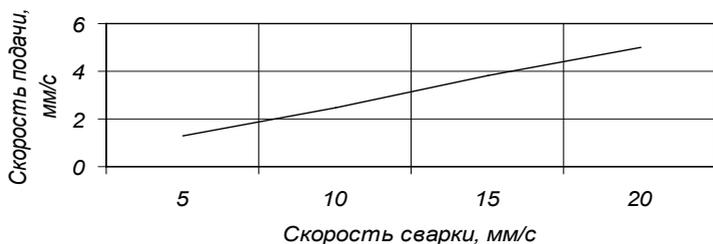
или проволоки). Сварку ведут на постоянном токе прямой полярности (минус — на электроде). Это облегчает зажигание и повышает устойчивость горения дуги при напряжении 10–15 В.

Дуга обратной полярности удаляет с поверхности свариваемого металла оксиды. Это улучшает свариваемость деталей из алюминия, магния и их сплавов. Однако обратная полярность уменьшает устойчивость горения и снижает стойкость вольфрамового электрода.

При сварке алюминиевых заготовок (рис. 16) в защитных газах поток тепла, поступающий в деталь, составляет более 80% от эффективной мощности, а тепловой поток, затрачиваемый на плавление металла намного меньше (чуть более 15%).



а



б

Рис. 16. Баланс тепловых потоков при сварке алюминиевых заготовок ($\lambda = 223 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot\text{К})$, $C_v = 2,7 \text{ МДж}/(\text{м}^3\cdot\text{К})$, $\omega = 84 \text{ мм}^2/\text{с}$) в защитных газах (а) и соотношение скоростей перемещения и подачи электрода (б) (напряжение $U = 10 \text{ В}$, ток $I = 400 \text{ А}$, $h = 0,6$, $N = 2,4 \text{ кВт}$)

Производительность сварки достаточно высокая и может быть еще повышена за счет применения больших токов.

Сварку в аргоне плавящимся электродом применяют для сварки толщин более 10 мм. Нормальное протекание процесса сварки обеспечивается при достаточно больших плотностях тока (100 А/мм² и более). Высокая плотность тока достигается большой скоростью подачи сварочной проволоки малого диаметра (0,5–3 мм). При этом осуществляется мелкокапельный или струйный перенос расплавленного металла электродной проволоки, глубокое проплавление основного металла, формирование плотного шва с ровной и чистой поверхностью. Этот процесс ведется на постоянном токе обратной полярности, т. к. при прямой полярности возрастает разбрызгивание металла и снижается устойчивость горения дуги.

2.4. Плазменная сварка и резка

Плазма образуется при электрических разрядах в газах или при нагреве газа до температуры, достаточно высокой для протекания интенсивной термической ионизации (10000–20000 °С). Она отличается от обычного газа рядом качественных особенностей, позволяющих считать ее особым, «четвертым» состоянием вещества (после жидкого, твердого и газообразного).

Для сварки плазму получают в виде плазменной струи, пропуская газ через столб сжатой дуги в плазменных горелках. Различают плазменную струю, выделенную из дуги (рис. 17, *а*), и плазменную дугу, совмещенную с плазменной струей (рис. 17, *б*). Плазменная дуга представляет собой дуговой разряд между нагреваемым или расплавляемым телом (анодом) и катодом электродугового плазмотрона.

В горелках для получения плазменной струи дуга 1 горит между вольфрамовым электродом 2 и соплом 4, к которому подключен положительный полюс источника тока (рис. 17, *а*). Электрод изолирован от корпуса горелки керамической прокладкой 3. Сопло интенсивно охлаждается водой. Из сопла выходит ярко светящаяся плазменная струя 6. Горелка питается постоянным током прямой полярности от источников с падающей характеристикой. Дугу зажигают с помощью осциллятора.

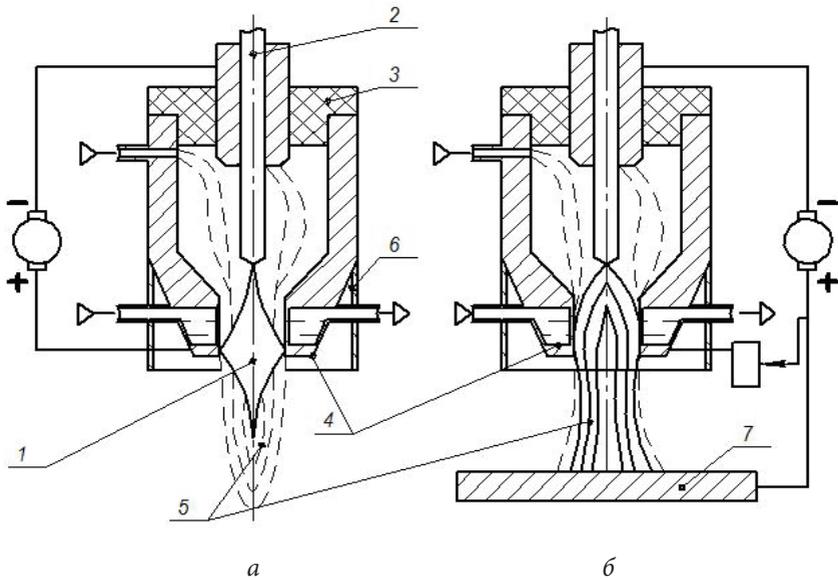


Рис. 17. Схемы получения плазменной струи, выделенной из дуги (а), и плазменной дуги, совмещенной с плазменной струей (б): 1 — дуга; 2 — вольфрамовый электрод; 3 — керамическая прокладка; 4 — корпус горелки; 5 — сопло; 6 — плазменная струя; 7 — заготовка

Горелки, предназначенные для сварки, снабжены для уменьшения температуры, вторым concentрическим соплом 5, через которое подается защитный газ.

Недостаток плазменной сварки (резки) заключается в недолговечности горелок из-за высокой температуры.

Плазменная струя представляет собой независимый источник теплоты, характеризующийся очень высокой температурой и относительно небольшой тепловой мощностью. Распределение температуры в свариваемой детали качественно соответствует функции точечного источника тепла при очень малых значениях времени выравнивания τ_1 . При этом температура плавления достигается очень близко к поверхности, и в тонких слоях поверхностного слоя сосредотачивается тепловая энергия, достаточная для расплавления материала. Поэтому плазменную струю можно применять для сварки (или резки) очень тонких металлических листов и неэлектропровод-

ных (нетеплопроводных) материалов, а также для напыления тугоплавких материалов на поверхность заготовки.

Плазменная дуга (рис. 17, б) горит между электродом и заготовкой 7. Для облегчения зажигания дуги вначале возбуждается мало-мощная вспомогательная дуга между электродом и соплом. Для этого к соплу подключен токопровод от положительного полюса источника тока. При прикосновении плазменной струи заготовки зажигается основная дуга, а вспомогательная выключается.

Из-за относительно больших тепловых потоков в деталь при равных мощностях производительность плазменной сварки меньше, чем при электрической дуговой сварке (рис. 18).

Однако для плазменной сварки характерно применение малых мощностей, что дает ей преимущество при выполнении сложных технологических работ с мелкими деталями из тугоплавких металлов.

Плазменная дуга имеет большую тепловую мощность в сравнении с плазменной струей. Ее используют для сварки и резки тугоплавких (титана, никеля, молибдена, вольфрама), а также для резки цветных металлов, характеризующихся высокой теплопроводностью (меди, алюминия).

Вследствие большой тепловой мощности температурное поле концентрируется вблизи источника, уменьшается тепловое влияние дуги на свариваемый металл, повышается КПД источника сварки,

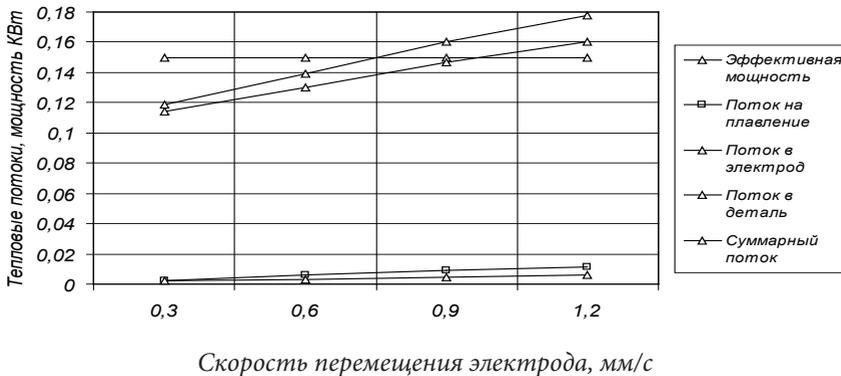


Рис. 18. Баланс тепловых потоков при плазменной сварке стальной заготовки при токе $I = 10$ А, $U = 20$ В, ширина фаски сварного шва $f = 1$ мм

увеличивается проплавливающая способность, расширяются технологические возможности. Плазменной дугой (струей) можно сваривать металл до 10 мм без разделки кромок и применения присадочного материала.

Плазменная дуга имеет высокую стабильность горения. Она позволяет сваривать очень тонкие листы металла (0,025–0,8 мм) на малых токах 0,5–10 А.

В отличие от автоматической сварки под флюсом, где основная доля мощности затрачивается на плавление электрода, при плазменной сварке почти вся мощность отводится в виде теплового потока в деталь.

Высокая температура плазменной струи позволяет легко плавить металл, но иногда она слишком высока для сварки. Увеличивая ток и расход газа, можно осуществлять плазменную резку расплавлением. При резке плазменной дугой металл выплавляется из полости реза направленным потоком плазмы, совпадающим с токоведущим столбом создающей его дуги прямого действия. Этим способом разрезают толстые (до 80–120 мм) листы алюминия и его сплавов, медные сплавы, высоколегированную сталь.

Плазменной струей, полученной в столбе дугового разряда независимой дуги, разрезают неэлектропроводные материалы (например, керамику), тонкие стальные листы, алюминиевые и медные сплавы, жаропрочные сплавы.

Скорость резки плазменной дугой выше, чем плазменной струей.

2.5. Электрошлаковая сварка

Электрошлаковую сварку (рис. 19) применяют в тех случаях, когда сварной шов необходимо заполнить большим количеством расплавленного металла. Такая необходимость наиболее часто возникает в тяжелом машиностроении, при сварке крупных деталей мостов, котлов высокого давления и гидротурбин. Она используется для изготовления ковано-сварных и литейно-сварных конструкций станин и деталей прессов, молотов, станков, коленчатых валов судовых двигателей и др.

Как правило, электрошлаковую сварку выполняют при вертикальном положении свариваемых заготовок. Сварной шов заполняет

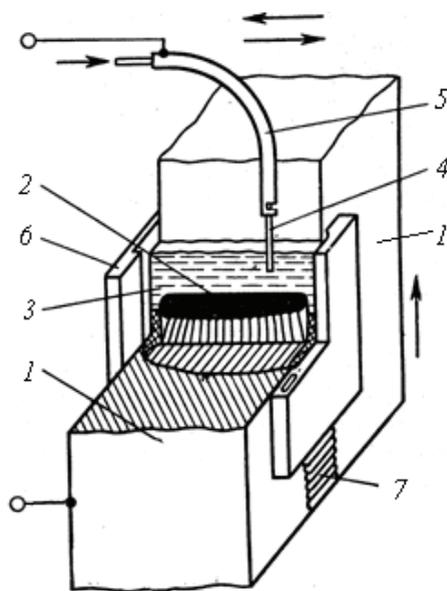


Рис. 19. Схема электрошлаковой сварки: 1 — свариваемые заготовки; 2 — сварочная ванна расплавленного металла; 3 — шлаковая ванна; 4 — сварочная проволока; 5 — мундштук; 6 — ползуны (формирующие устройства); 7 — затвердевший сварной шов

зазор между свариваемыми поверхностями заготовок. В этом зазоре (или пространстве), ограниченном с двух сторон поверхностями свариваемых заготовок 6, а с двух других сторон формирующими устройствами (ползунами) 7, создается шлаковая ванна.

При электрошлаковой сварке теплота образуется при пропускании электрического тока через шлаковую ванну. Высокая температура расплавленного шлака (до 2000 °С) достаточна для расплавления металла электродной проволоки (или электродных пластин) и основного металла. Высокая температура поддерживается за счет больших токов (750–1000 А), обеспечивающих, соответственно, большую мощность источника тепла.

В связи с наличием перемещения электродной проволоки по ширине шва, вертикальное перемещение мундштука вдоль шва осуще-

ствляется с очень малой скоростью. Высокая производительность электрошлаковой сварки определяется большим объемом заполняемого в единицу времени металлом сварочного шва, а не скоростью перемещения мундштука в вертикальном направлении. В отличие от плазменной сварки при электрошлаковой сварке тепловые потоки в деталь относительно невелики (рис. 20).

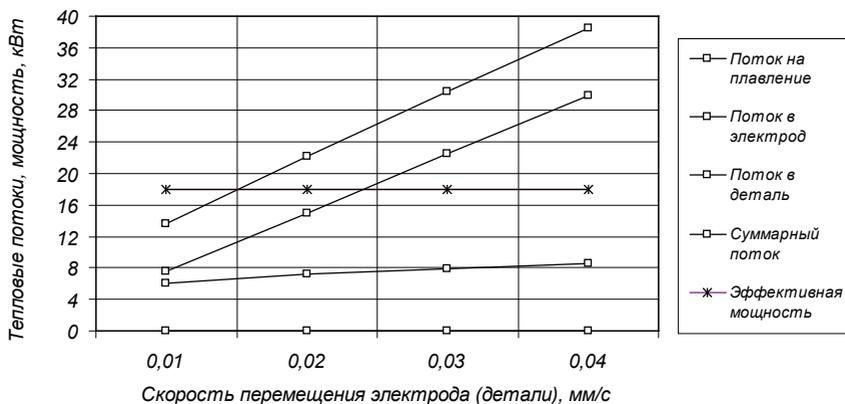


Рис. 20. Баланс тепловых потоков при электрошлаковой сварке стальной заготовки при токе $I = 1000 \text{ A}$; $U = 20 \text{ В}$; ширина и длина сварочного шва $B \cdot H = 300 \cdot 150 \text{ мм}$

Из-за большого объема расплавляемого металла подача электродной проволоки при электрошлаковой сварке осуществляется с гораздо более высокой скоростью, чем скорость перемещения ползунов.

2.6. Газовая сварка

При газовой сварке источником теплоты является сгорание горючих газов (чаще всего — ацетилена) в атмосфере кислорода.

Ацетилено-кислородное пламя состоит из внутреннего ядра 1, средней зоны 2 и наружного факела (рис. 21).

Внутреннее ядро и средняя зона пламени соответствуют двум последовательным стадиям горения ацетилена. Во внутреннем ядре горючая смесь находится в стадии тепловой и химической подготов-

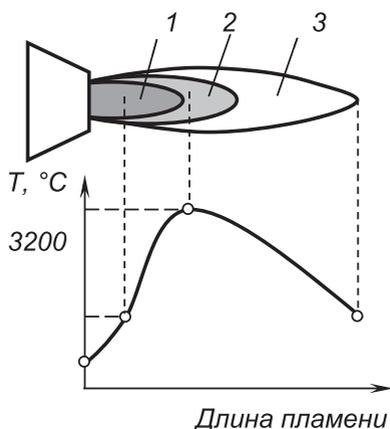
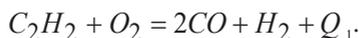


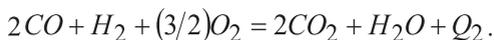
Рис. 21. Газосварочное пламя: 1 — ядро пламени; 2 — средняя зона; 3 — факел пламени

ки к воспламенению. В средней зоне пламени 2 начинается активное воздействие кислорода и происходит неполное сгорание ацетилена в соответствии с экзотермической реакцией. Ацетилен разлагается с образованием водорода и оксида углерода:

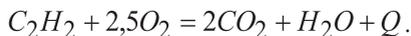


В средней зоне выделяется около 44% теплоты. В факеле выделяется около 56% теплоты ($Q_1 \gg 21$ МДж/м³). Температура в середине факела составляет 2400–2600 °С.

Благодаря этому именно в средней зоне пламени достигается максимальная температура — около 3100 °С. В факеле горючие газы догорают: водород образует водяной пар, а оксид углерода — углекислый газ:



Уравнение полного сгорания ацетилена имеет вид:



Низшая теплотворная способность ацетилена $Q \gg 48$ МДж/м³.

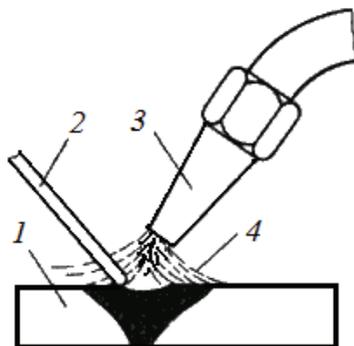


Рис. 22. Схема газовой сварки: 1 — свариваемые заготовки; 2 — присадочный пруток; 3 — горелка; 4 — пламя

При газовой сварке место соединения нагревают до расплавления высокотемпературным газовым пламенем (рис. 22).

При нагреве газовым пламенем 4 кромки свариваемых заготовок 1 расплавляются, а зазор между ними заполняется присадочным материалом 2, который вводят в пламя горелки 3 извне.

При газовой сварке заготовки нагреваются медленнее, чем при дуговой. Этим определяются области рационального применения газовой сварки: для сварки листов металла малой толщины (0,2–3 мм), легкоплавких цветных металлов и сплавов, инструментальных сталей, для пайки и наплавочных работ и др.

Для образования газосварочного пламени используют газосварочные горелки. Наиболее распространены инжекторные горелки (рис. 23).

В инжекторной горелке кислород под давлением 0,1–0,4 МПа через регулировочный вентиль 6 и трубку подается к инжектору 5. Выходя с большой скоростью из узкого канала инжекторного конуса, кислород создает разрежение в камере 4 и засасывает горючий газ, поступающий через вентиль в ацетиленовые каналы горелки и камеру смешения 3, где образуется горючая смесь. Горючая смесь поступает к наконечнику 2 к мундштуку 1, на выходе из которого при сгорании образуется сварочное пламя. Горелки имеют сменные наконечники с различными диаметрами выходных отверстий

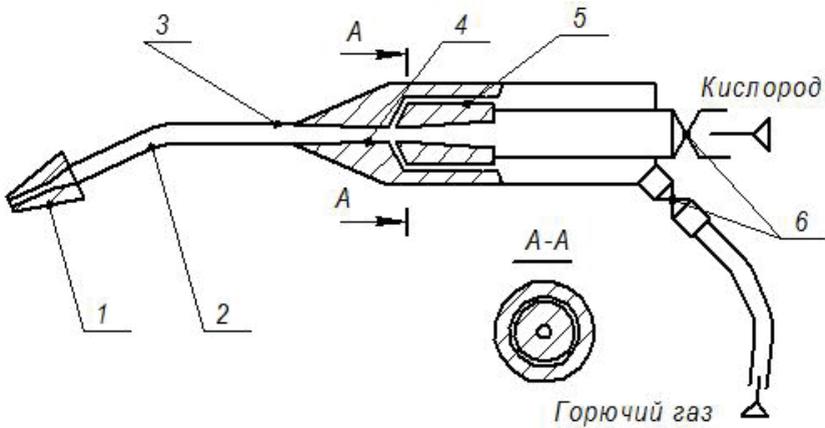


Рис. 23. Схема газосварочной инжекторной горелки: 1 — мундштук; 2 — наконечник; 3 — камера смешения; 4 — камера; 5 — инжектор; 6 — регулировочные вентили

инжектора и мундштука для регулирования мощности ацетилено-кислородного пламени.

Эффективный КПД процесса нагрева металла газовым пламенем равен отношению эффективной мощности пламени к полной мощности, соответствующей теплотворной способности горючего:

$$\eta = \frac{q}{q_{C_2H_2}}. \quad (1)$$

Мощность газового пламени хотя и возрастает с увеличением расхода горючего, но медленнее, чем увеличивается расход. При этом КПД уменьшается с увеличением расхода горючего (рис. 24).

Металл обычно нагревают средней зоной пламени. Расстояние от сопла до поверхности изделия выбирают равным от $1,2L$ до $1,5L$ (L — длина ядра пламени). При этом наиболее нагретая зона пламени соприкасается с нагреваемой поверхностью. Теоретически соотношение кислорода и ацетилена должно быть 1:1. Однако практически в горелку подают смесь при соотношении кислорода к ацетилену $\gg 1,15 \dots 1,2$.

Нагрев металла газовым пламенем обусловлен теплообменом между горячими газами пламени и омываемым ими участком поверх-

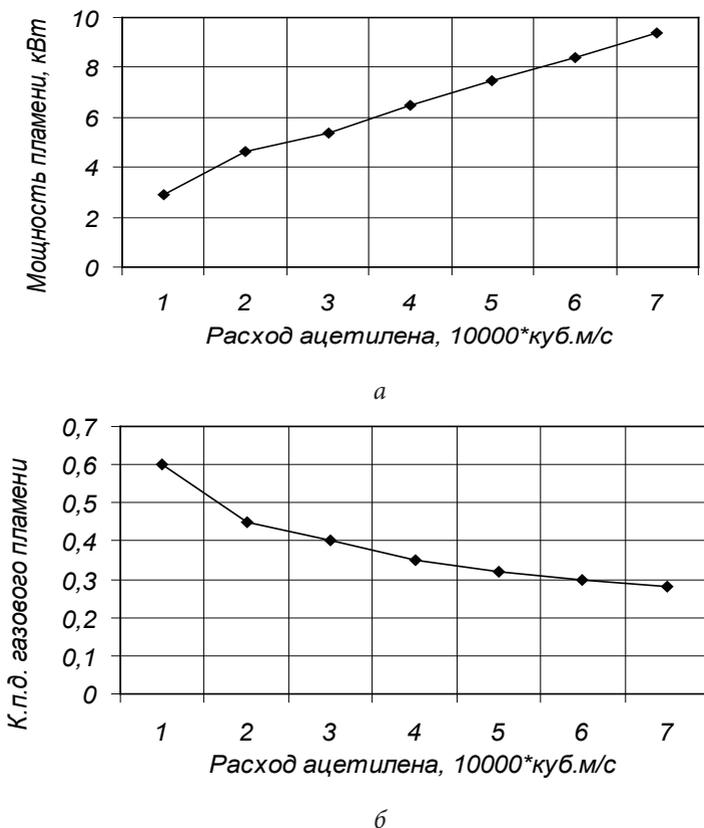


Рис. 24. Зависимости мощности (а) и КПД (б) газового пламени от расхода ацетилена

ности нагреваемого тела. Вследствие растекания газового потока пламя нагревает значительную по размерам область поверхности изделия.

Газовое пламя горелки с наибольшим расходом ацетилена ($\approx 9,4$ кВт) развивает примерно в 8 раз меньшую плотность теплового потока, чем близкая по эффективной мощности электрическая дуга со стальными электродами при токе 550 А. При этом диаметр пятна нагрева газовым пламенем примерно втрое больше, чем электрической дугой.

Присадочную проволоку (или стержни) выбирают с учетом состава свариваемого сплава. Кроме того, для сварки цветных металлов и некоторых специальных сплавов используют флюсы в виде порошков или паст, которые растворяют оксиды, образуют шлаки и содержат элементы, раскисляющие и легирующие наплавленный металл (например, для сварки меди применяют кислые флюсы: буру, буру с борной кислотой).

3. ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКИЕ СПОСОБЫ СВАРКИ

3.1. Электрическая контактная стыковая сварка

Электрическая контактная сварка осуществляется с помощью нагрева свариваемых заготовок в месте контакта и пластической деформации контактируемых поверхностей, в ходе которой формируется сварное соединение.

Электрическую контактную сварку классифицируют по типу сварного соединения и роду тока. По типу сварного соединения электрическая контактная сварка может быть стыковой (рис. 25), точечной или шовной.

По роду тока различают электрическую контактную сварку переменным током, импульсами постоянного тока, аккумулированной энергией.

В зависимости от температуры нагревания стыка различают электрическую контактную стыковую сварку сопротивлением или оплавлением.

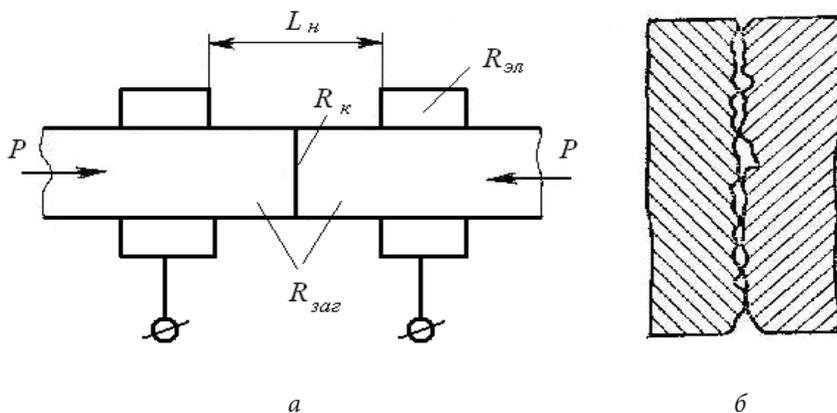


Рис. 25. Схема контактной сварки (а) и физического контакта (б) свариваемых деталей

Стыковая сварка — разновидность контактной сварки, при которой заготовки свариваются по всей поверхности соприкосновения.

Свариваемые заготовки закрепляют в зажимах 2 и 3 стыковой машины (рис. 26). Зажим 2 укреплен на неподвижной плите 4, а зажим 3 — на подвижной плите 5, перемещающейся в направляющих. Электрическое напряжение подается на зажимы 2 и 3 через сварочный трансформатор 6. Подвижная плита способна перемещаться в направлении неподвижной плиты до осуществления контакта заготовок 1 и сжимать заготовки с усилием P , развиваемым механизмом осадки.

При увеличении площади поперечного сечения заготовок для достижения одной и той же плотности теплового потока потребуется большая мощность. Поэтому во избежание резкого увеличения мощностей, применяемых токов и связанных с этим технических трудностей, площадь поперечного сечения свариваемых заготовок при контактной стыковой сварке обычно не превышает 100 мм^2 .

При электрической контактной сварке (рис. 25, 26) теплота выделяется при пропускании электрического тока через место сварочного контакта, имеющее наибольшее электрическое сопротивление сварочного контура.

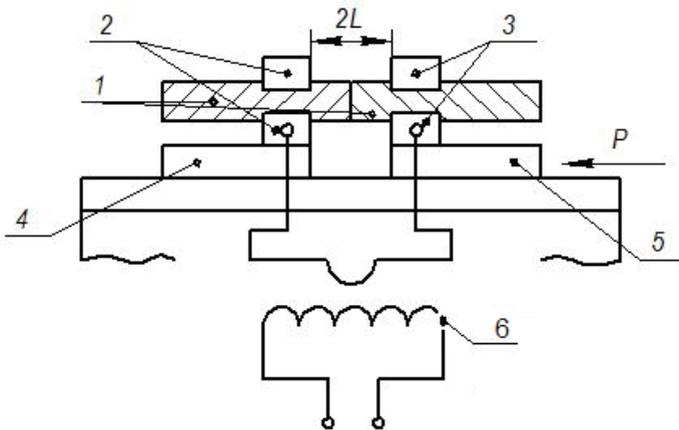


Рис. 26. Схема контактной стыковой сварки: 1 — свариваемые заготовки; 2, 3 — зажимы; 4 — неподвижная плита; 5 — подвижная плита; 6 — сварочный трансформатор

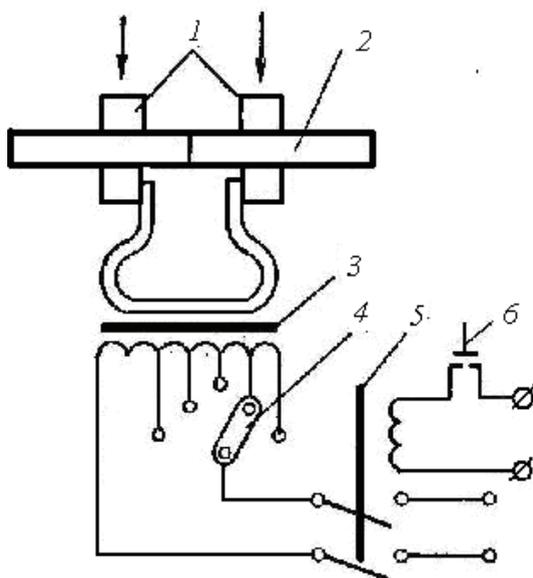


Рис. 27. Электрическая схема контактной машины:
 1 — контактная колодка; 2 — свариваемое изделие;
 3 — сварочный трансформатор; 4 — регулятор тока;
 5 — электромагнитный прерыватель; 6 — включающая кнопка

Электрическая схема контактных машин включает трансформатор 3, прерыватель тока 5 и переключатель ступеней мощности 4 (рис. 27).

На первичную обмотку подают напряжение 220–380 В. Первичная обмотка трансформатора имеет несколько секций для переключения ступеней мощности, вторичная — 1–2 витка. Поэтому напряжение на вторичной обмотке снижается до 1–12 В, а ток увеличивается до 1000–100000 А. Машины для стыковой сварки выпускают мощностью от 5 до 500 кВт.

При стыковой сварке сопротивлением разогрев стыка осуществляется до высоких температур, достаточных для приведения области контакта в пластическое состояние, но не превышающих температуру плавления. При сварке оплавлением достигается температура

плавления металла (или несколько более высокая), в результате чего часть материала в области контакта оплавляется.

Сваркой сопротивлением можно сваривать низкоуглеродистые и низколегированные конструкционные стали, алюминиевые и медные сплавы.

Фактический ток во вторичной обмотке сварочного трансформатора обычно на два порядка больше, чем в первичной, а напряжение, соответственно меньше.

Зависимости тока I и усилия P от времени нагрева показывают на рисунке, называемом *циклограммой* (рис. 28).

Перед контактной стыковой сваркой сопротивлением торцы заготовок должны быть плотно пригнаны друг к другу. Для этого необходима механическая обработка торцов заготовок резанием. Кроме того, заготовки необходимо очищать от оксидных пленок. Все эти требования могут быть снижены при обеспечении более равномерного прогрева стержней вблизи торцовых поверхностей. На практике это достигается путем нагрева несколькими импульсами тока (рис. 28, б)

Сварка оплавлением не предъявляет высоких требований к качеству поверхностей свариваемых заготовок. В этом случае нагрев ведется до температур, превышающих температуру плавления. В процессе оплавления материала выравниваются неровности стыка, а ок-

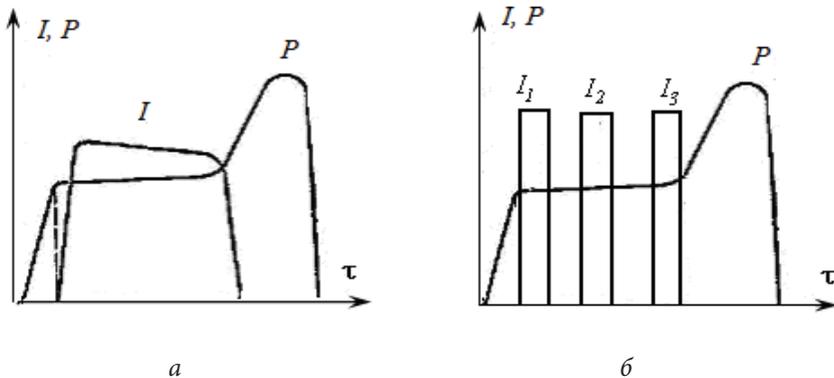


Рис. 28. Циклограмма контактной стыковой сварки сопротивлением:
 а — нагрев одним импульсом; б — нагрев несколькими импульсами

сиды и загрязнения удаляются. Сварка оплавлением характеризуется большей универсальностью. Она позволяет сваривать заготовки более сложного сечения и формы, заготовки, имеющие различные сечения и даже разнородные металлы (быстрорежущую и углеродистую стали, медь и алюминий и т. д.).

3.2. Электрическая контактная точечная сварка

Точечная сварка — разновидность контактной сварки, при которой заготовки соединяются в отдельных точках (рис. 29).

Точечной сваркой соединяют штампованные элементы заготовок. Машины для точечной сварки выпускают мощностью от 0,1 до 250 кВт. Толщина свариваемых заготовок составляет 0,5–5 мм.

При точечной сварке заготовки собирают внахлест и зажимают с усилием P между двумя электродами, подводящими ток к месту сварки. При этом соприкасающиеся с медными электродами поверхности свариваемых заготовок нагреваются меньше, чем внутренние слои. Нагрев продолжают в течение времени t , необходимого для расплавления внутренних слоев (некоторой окрестности точки заданного радиуса r) и до пластического состояния внешних слоев.

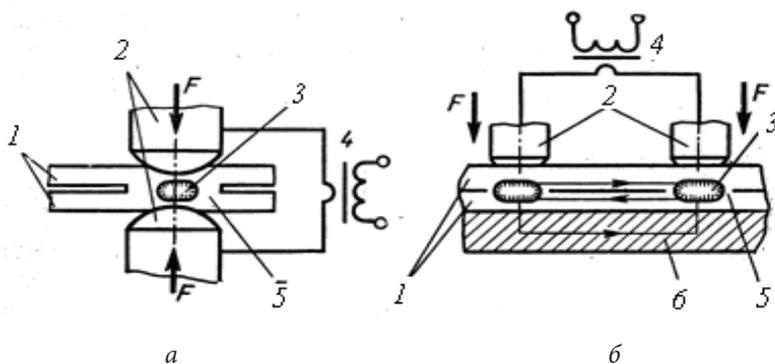


Рис. 29. Схемы контактной точечной сварки: а — двусторонней; б — односторонней (1 — свариваемые элементы; 2 — медные электроды; 3 — расплавленная зона металла; 4 — источник питания)

После выключения тока происходит кристаллизация расплавленного металла и образуется литая сварная точка.

При проведении точечной сварки возможна одна из двух стратегий. Согласно первой: при меньшей мощности источника осуществлять прогрев и расплавление металла, не следя строго за временем, ориентируясь на предельное температурное состояние. Согласно второй — сварку производить при большей мощности, на более жестком режиме, но при этом своевременно отключать подачу тока, не доводя температуры до предельных значений. Второй путь более производительный, но для исключения перегрева необходимо точно выдерживать рациональное время подачи тока.

Как показывают расчеты, уже через 1,5–2 с температура становится достаточно близкой к предельной. Существенное влияние на температуру оказывают мощность источника и теплофизические характеристики свариваемого материала. Так, например, при точечной сварке медных пластин необходима на порядок большая мощность источника (рис. 30).

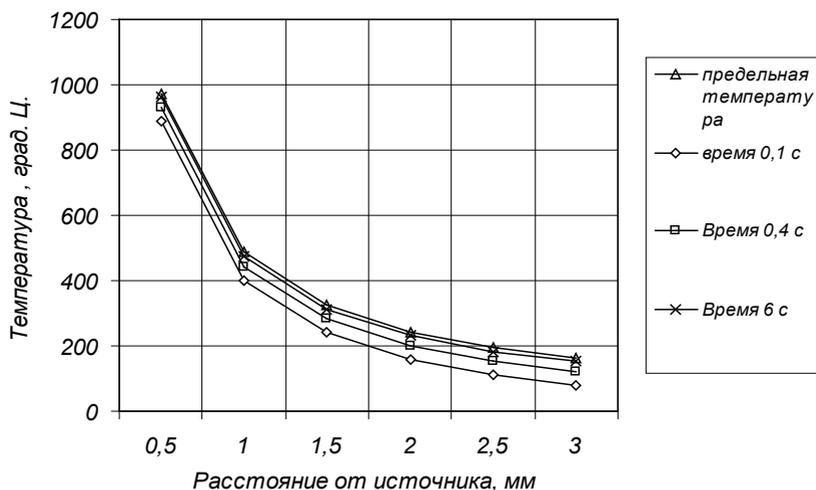


Рис. 30. Зависимости температуры от расстояния от источника тепла в различные моменты времени при точечной сварке медных пластин. (мощность источника $q=2,2$ кВт)

3.3. Электрическая контактная шовная сварка

Шовная сварка — разновидность контактной сварки, позволяющая получать прочное и плотное соединение листовых заготовок в виде сплошного герметичного шва. Электроды для шовной сварки выполняют в виде плоских роликов (дисков). Листовые заготовки 2 (рис. 31) соединяют внахлест, зажимают между электродами 1 и пропускают ток.

При движении роликов по заготовкам между заготовками в месте контакта электродов с ними выделяется тепло, нагревающее заготовки до расплавления металла в местах наибольшего тепловыделения. При перемещении электродов происходит охлаждение и кристаллизация расплавленного металла с образованием непрерывного шва.

На распределение температуры большое влияние оказывают мощность источника, толщина пластины, теплофизические характеристики материала свариваемых деталей. При прочих равных условиях с увеличением скорости сварки температура снижается (рис. 32).

Циклограммы процесса шовной сварки бывают с непрерывной или прерывистой подачей тока в виде импульсов (рис. 33).

Шовную сварку применяют в массовом производстве при изготовлении различных сосудов. Машины для шовной сварки по конструктивному исполнению похожи на машины для точечной сварки и отличаются от них главным образом формой электродов, имеющих

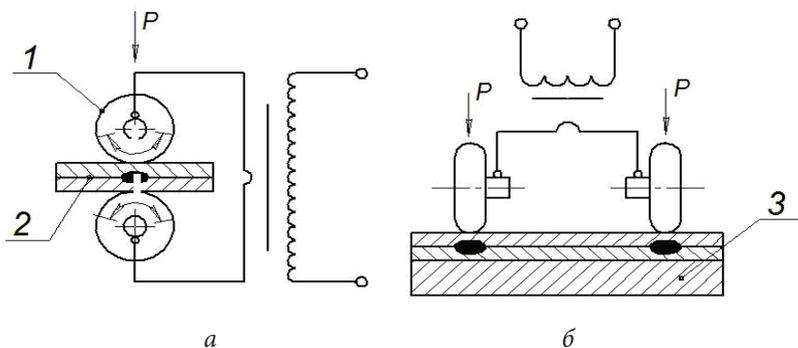
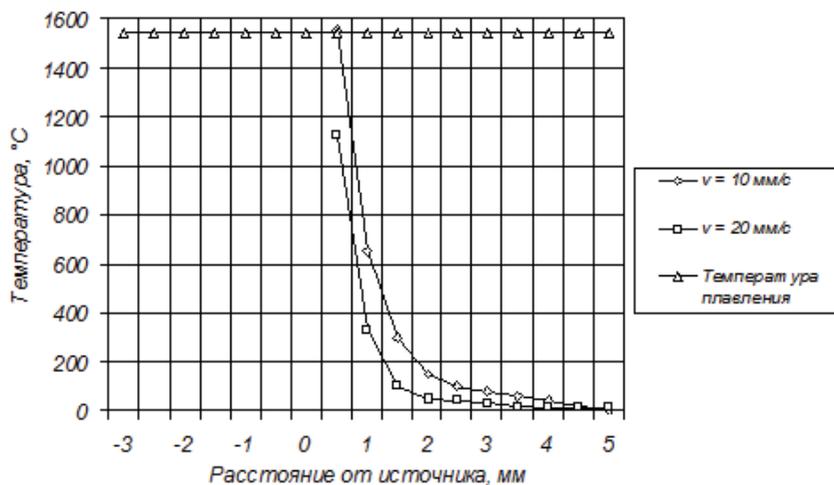
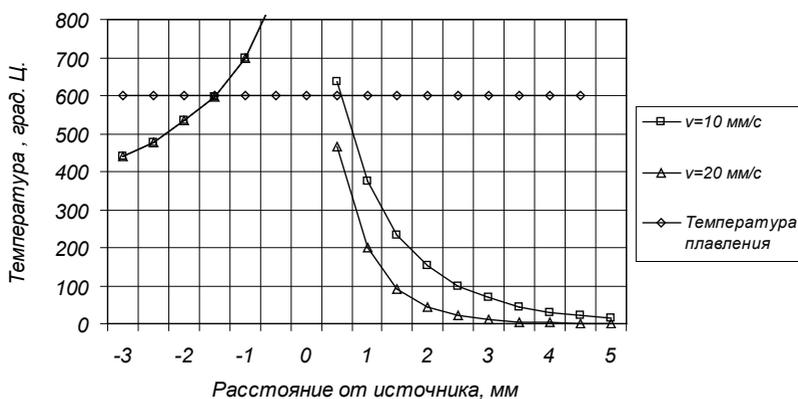


Рис. 31. Принципиальная схема шовной сварки: а — двусторонней; б — односторонней (1 — электроды; 2 — заготовки; 3 — медная подкладка)



а)



б)

Рис. 32. Распределение температуры: а) в стальной пластине ($\delta = 3$ мм; $N_e = 1,2$ кВт); б) в алюминиевой пластине ($d = 3$ мм; $N_e = 1$ кВт) при шовной сварке

форму роликов. Мощность шовных сварочных машин может быть в пределах от 25 до 200 кВт. Толщина свариваемых листов обычно находится в пределах от 0,3 до 3 мм.

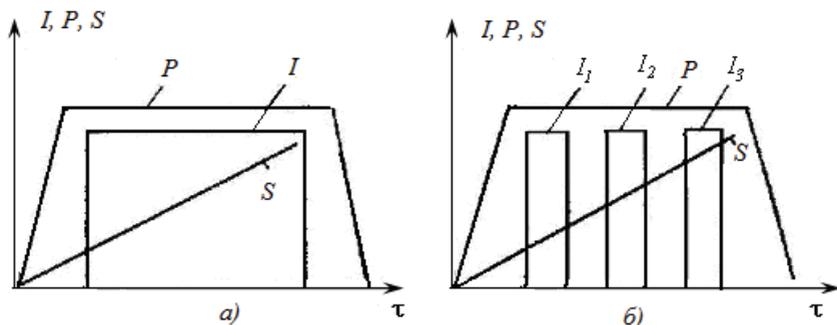


Рис. 33. Циклы шовной сварки: а — непрерывного включения тока; б — прерывистого включения тока (P — давление, S — перемещение роликов, I — сварочный ток, τ — время)

3.4. Конденсаторная сварка

Конденсаторная сварка осуществляется за счет энергии, накопленной в батарее конденсаторов при их зарядке от источника постоянного тока.

Используются два способа конденсаторной сварки (рис. 34). Согласно первому способу конденсаторы разряжаются непосредственно на свариваемые детали, а согласно второму — на первичную обмотку сварочного трансформатора.

На рис. 16.34, а представлена схема ударной конденсаторной сварки, при которой концы обкладок конденсатора подключены непосредственно к свариваемым заготовкам 2 и 3. Одна из заготовок жестко закреплена, другая может перемещаться в направляющих 5. При освобождении защелки 4, заготовка 2 переместится к неподвижной заготовке 3 и замкнет цепь. При соударении возникает разряд, вызывающий оплавление торцов обеих заготовок. В момент соударения заготовок в результате местной пластической деформации происходит схватывание поверхностей, необходимое для образования неразъемного соединения.

Схема конденсаторной сварки, при которой разряд конденсатора преобразуется с помощью сварочного трансформатора (рис. 34, б),

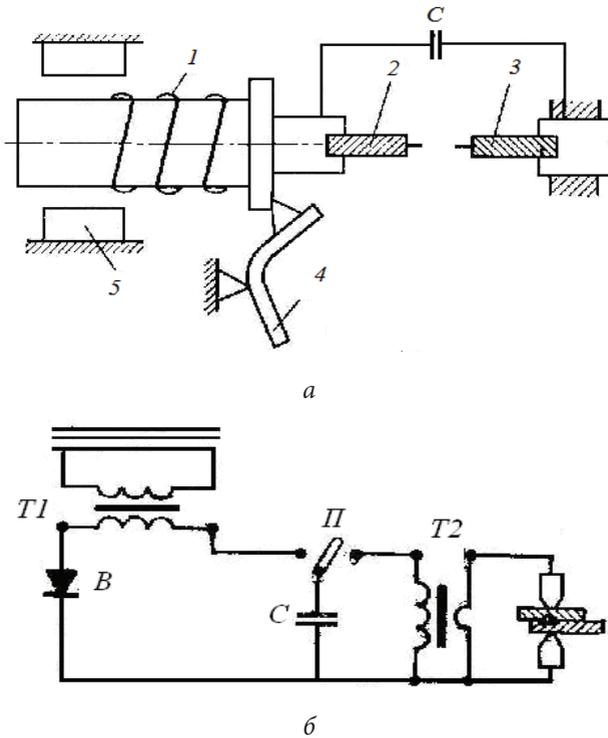


Рис. 34. Схемы конденсаторной сварки: а — с подачей тока непосредственно от конденсатора на свариваемые заготовки (1 — пружина; 2, 3 — свариваемые заготовки; 4 — защелка; 5 — направляющие; В — выпрямитель, П — переключатель, С — конденсаторная батарея); б — с подачей тока от конденсатора на первичную обмотку сварочного конденсатора (Т1 — повышающий трансформатор, Т2 — сварочный трансформатор)

используется для точечной и шовной сварки, но может быть использована и для стыковой сварки.

Время разрядки конденсаторной батареи измеряется тысячными или десятитысячными долями секунды (рис. 35).

Благодаря этому при небольшой энергии ($Q = 0,02-0,05$ Дж) достигаются необходимые мощности и соответственно большие плотности теплового потока ($600-1200$ Вт/мм²).

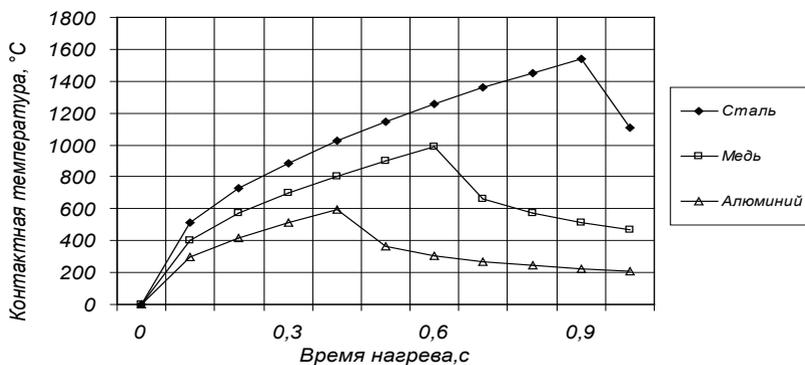


Рис. 35. Зависимости температуры от времени разряда при конденсаторной сварке стальных, медных и алюминиевых проводов диаметром 0,2 мм при количестве тепла $Q = 0,02-0,05$ Дж и мощности разряда 40–80 Вт

Как показывают расчеты, при уменьшении времени действия источника тепла от 1 до 0,001 с, количество теплоты, необходимой для разогрева торцов заготовок до температуры плавления, уменьшается в 32 раза (от 1,15 до 0,036 Дж).

Конденсаторную сварку применяют в производстве электроизмерительных и авиационных приборов, часовых механизмов, фотоаппаратов и т. п.

3.5. Сварка трением

Сварка трением осуществляется за счет адгезии (схватывания) контактируемых поверхностей. Как известно, схватывание поверхностей происходит при определенных условиях. К их числу относятся повышенная температура (приближающаяся к температуре плавления), отсутствие на контактируемых поверхностях оксидных пленок и загрязнений, пластические деформации контактируемых поверхностей под действием сжимающих сил (осаживания). Особенностью сварки трением является то, что, нагрев в зоне контакта осуществляется за счет трения (рис. 36).

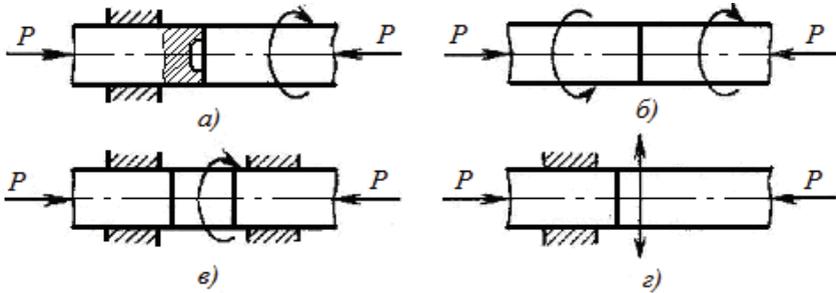


Рис. 36. Принципиальные схемы сварки трением: а — вращение одной детали; б — вращение обеих деталей; в-сварка неподвижных деталей с вращающейся вставкой; г — сварка при возвратно-поступательном движении одной детали

Для обеспечения рациональных условий схватывания при сварке трением целесообразно исключать среднюю часть свариваемых заготовок, так как при приближении к оси вращения заготовок температура будет уменьшаться. (рис. 37).

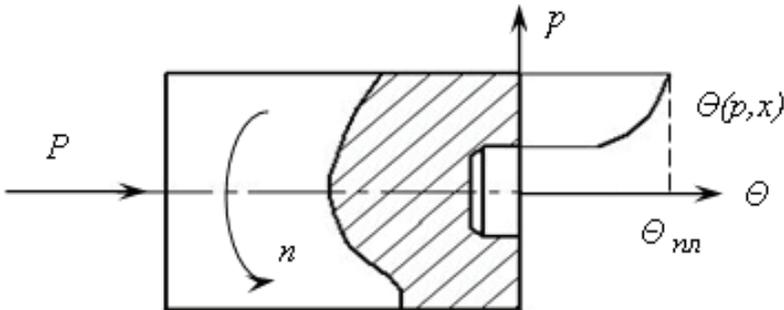


Рис. 37. Схема распределения температуры по торцу заготовки при сварке трением

Соединение заготовок сваркой трением получают с достаточно высокими свойствами. При сварке трением энергетические затраты значительно (в 5–10 раз) ниже, чем при электрической контактной стыковой сварке.

Для сварки трением выпускают серийные машины мощностью 10, 20 и 40 кВт, а также модернизируют для этой цели металлорежущие станки (токарные, фрезерные, сверлильные).

3.6. Ультразвуковая сварка

Ультразвуковую сварку можно отнести к разновидностям контактной сварки, осуществляющейся под давлением наконечника 4 ультразвукового инструмента на свариваемые заготовки 5 (рис. 38).

При ультразвуковой сварке заготовки 5 размещают на опоре 6. На магнитострикционный преобразователь 1 подается напряжение переменного тока с ультразвуковой частотой, которое преобразуется в продольные упругие колебания. Эти колебания усиливаются трансформатором упругих колебаний 2, который вместе с рабочим инструментом 3 представляет собой волновод. Момент M , приложенный в узле колебаний, создает необходимую сжимающую силу P .

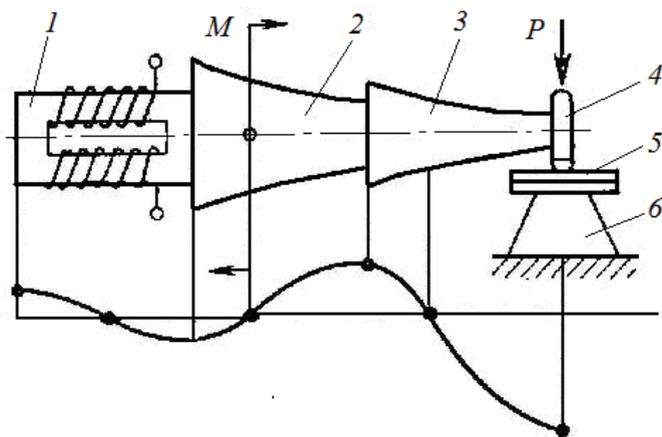


Рис. 38. Принципиальная схема ультразвуковой сварки:

1 — магнитострикционный преобразователь; 2 — трансформатор продольных упругих колебаний, 3 — рабочий инструмент; 4 — наконечник рабочего инструмента; 5 — свариваемые заготовки; 6 — опора

Наложение механических колебаний с ультразвуковой частотой вызывает силы трения и выделение теплоты на свариваемых поверхностях заготовок, сдвиговые деформации, разрушающие поверхностные пленки, способствует возникновению межатомных связей (адгезии) при меньших давлениях и температурах по сравнению с деформациями при отсутствии колебаний.

Например, при ультразвуковой сварке меди рациональная контактная температура не превышает 600 °С, а при сварке алюминия — 300 °С. Ультразвуковой сваркой можно сваривать очень тонкие листы и фольгу толщиной до 1 мкм, а также приваривать фольгу и тонкие пластины к заготовкам неограниченной толщины.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Бельский, Е. И. Новые материалы в технике / Е. И. Бельский, А. М. Дмитриевич, Е. Б. Ложечников. — Мн.: Беларусь, 1971.— 272 с.
2. Васин, С. А. Резание материалов: Термомеханический подход к системе взаимосвязей при резании: учеб. для техн. вузов / С. А. Васин, А. С. Верещака, В. С. Кушнер. — М.: Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2001.— 448 с.
3. Гуляев, А. П. Металловедение: учеб. для вузов / А. П. Гуляев.— 6-е изд., перераб. и доп. — М.: Металлургия, 1986.— 544 с.
4. Конструкционные материалы: справочник / Арзамасов Б. Н., Бростром В. А., Буше Н. А. [и др.]; общ. ред. Арзамасов Б. Н. — М.: Машиностроение, 1990.— 687 с.: ил.
5. Кушнер, В. С. Тепловые основы технологических способов машиностроительного производства: учеб. пособие / В. С. Кушнер. — Омск: Изд-во ОмГТУ, 1995.— 68 с.
6. Лахтин, Ю. М. Материаловедение: учебник для студентов вузов / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева.— 3-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1990.— 528 с.
7. Лахтин, Ю. М. Материаловедение и термическая обработка металлов: учебник для студентов вузов / Ю. М. Лахтин, В. П. Леонтьева. — М.: Металлургия, 1984.— 360 с.
8. Материаловедение и технология конструкционных материалов для железнодорожной техники: учебник для вузов ж.-д. трансп. / [Н.Н. Воронин, Д.Г. Евсеев, В.В. Засыпкин и др.; под ред. Н.Н. Воронина]. — М.: Маршрут, 2004.— 456 с.
9. Технологические процессы в машиностроении: учеб. для машиностроительных направлений и специальностей техн. университетов. В 3 ч. / [В. С. Кушнер, А. С. Верещака, А. Г. Схиртладзе, Д. А. Негров; под ред. В. С. Кушнера]. — Омск: Изд-во ОмГТУ, 2005. — Ч. 1.— 200 с.; Ч. 2.— 200 с.; Ч. 3.— 172 с.
10. Технология конструкционных материалов: учеб. для машиностр. спец. вузов / [А. М. Дальский, И. А. Арутюнова, Т. М. Барсукова и др.; под общ. ред. А. М. Дальского].— 2-е изд., перераб. и доп. — М.: Машиностроение, 1985.— 448 с.

ДЛЯ ЗАМЕТОК

Учебное издание

Воробьёв Александр Алфеевич, **Битюцкий** Никита Александрович,
Новосельский Игорь Юрьевич, **Соболев** Александр Альбертович

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ. ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ
МАТЕРИАЛОВ (СВАРОЧНОЕ ПРОИЗВОДСТВО)

Выпускающий редактор Е. И. Осянина
Подготовка оригинал-макета М. В. Голубцов

Подписано в печать 11.01.2024. Формат 60x84/16. Усл. печ. л. 3,24.
Тираж 250 экз. Заказ 1901.

Издательство «Бук». 420029, г. Казань, ул. Академика Кирпичникова, д. 25.
Отпечатано в издательстве «Бук»