

11 коп.

Индекс 70 067

Книжка
Лямов
Рубан.
Точенно А



НОВОЕ
В ЖИЗНИ, НАУКЕ,
ТЕХНИКЕ

ЗНАНИЕ

5/1975

СЕРИЯ
ТЕХНИКА

Г. Юргис
СОЕДИНЕНИЕ
МАТЕРИАЛОВ



Юргис Г.
Ю65 Соединение материалов. М., «Знание»,
1975.

64 с. (Новое в жизни, науке, технике. Серия «Техника», 5. Издается ежемесячно с 1961 г.)

Брошюра посвящена одной из актуальных проблем современной техники — проблеме соединения материалов. Основное внимание, естественно, уделяется сварке. Описываются модифицированные классические методы сварки — контактный, дуговой, и перспективные, которые еще находятся в стадии становления: сварка плазмой, пучком электронов, лучом лазера, ультразвуком, токами высокой частоты. Приводятся методы соединения пластических материалов. Последние главы автор отвел для рассказа о пайке и склеивании.

Брошюра рассчитана на широкий круг читателей.

31206

6П4.3

СОДЕРЖАНИЕ

Классические виды сварки в современной технике	3
Сварка трением, <u>сварка взрывом</u> , <u>диффузионная сварка</u>	22
Сварка плазмой, пучком электронов и <u>лучом лазера</u>	30
Сварка ультразвуком и токами высокой частоты	35
Основные направления дальнейшего развития науки о сварке	38
Соединение деталей из пластмасс и полимерных пленок	41
Вторая жизнь пайки	49
Склеивание	53
Заключение	60
Литература	64

ЮРГИС Гедиминас

СОЕДИНЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

Редактор Г. И. Флиорент. Обложка В. Б. Лукин.
Худож. редактор Т. И. Добровольнова. Техн. редактор
А. М. Красавина. Корректор Т. Ю. Дорогова.

А 02509. Индекс заказа 55005. Сдано в набор 17/III 1975 г. Подписано к печати 14/III 1975 г. Формат бумаги 84×108^{1/2}. Бумага типографская № 1. Бум. л. 1. Печ. л. 2. Усл.-печ. л. 3,36. Уч.-изд. л. 3,48. Тираж 68 720 экз. Издательство «Знание», 101835, Москва, Центр, проезд Серова, д. 3/4. Заказ 535. Типография Всесоюзного общества «Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4. Цена 11 коп.

© Издательство «Знание», 1975 г.

Классические виды сварки
в современной технике

Научно-технический прогресс постоянно ставит перед специалистами в области соединения материалов все новые и новые задачи. Эти задачи связаны и с разработкой технических систем, промышленное создание которых традиционными методами слишком сложно, дорого, а подчас и невозможно. Такого рода задачи возникают и в связи с появлением новых материалов, которые классическими способами надежно вообще соединить нельзя. Наконец, практика часто требует разработки новых способов соединения материалов или по крайней мере создания новой технологии, основанной на классическом методе. Рассказ о «мире» соединения материалов мы начнем со сварки.

Когда речь заходит о сварке, то прежде всего представляется человек в маске, защищающей лицо от нестерпимо яркого света электрической дуги. В целом такое представление правильно: дуговая сварка — самый распространенный и самый «старший» способ. Еще в конце XIX в. одаренный русский изобретатель Н. Н. Бенардос впервые осуществил сварку металлических частей с помощью вольтовой дуги, возникавшей между свариваемым изделием и угольным электродом.

Сейчас сварка имеет на вооружении такие методы нагрева, о которых еще несколько десятилетий назад и мечтать было невозможно. Существуют и холодные виды сварки. Но обо всем этом речь пойдет в последующих главах. А здесь мы расскажем о современном состоянии классических видов сварки. И все же начнем мы не с дуговой (о ней — чуть позже), а с двух других способов:

в первом дуга используется только для «затравки», а во втором в ней и вообще нет необходимости.

Электрошлаковая сварка. Основное назначение ее — соединение крупногабаритных литых и кованных элементов конструкций. Благодаря электрошлаковой сварке в современных тяжелых машинах и механизмах работают не литые и кованные узлы, а сварно-литые, сварно-прокатные, сварно-кованные. Тяжелое оборудование теперь могут выпускать заводы, не располагающие большими литейными и кузнечно-прессовыми цехами. Еще одно преимущество — большая экономия металла на процессе обработки заготовок.

В 1970 г. на металлургическом заводе города Коммунарска впервые в мире были соединены с помощью электрошлаковой сварки два гигантских стальных слитка. (Кстати сами эти слитки высококачистой стали были получены методом электрошлакового переплава.) Значение этого, уже ставшего достоянием истории техники, события трудно переоценить. С каждым годом появляются машины и механизмы все более грандиозных размеров. Достаточно вспомнить о сверхгигантских турбогенераторах для современных больших гидроэлектростанций, о станках величиной с многоэтажный дом и других великанах современной техники. Причем это тенденция явно прогрессирующая. Так где же нам сегодня — и тем более нашим потомкам завтра — брать те гигантские слитки, из которых можно получить требуемую заготовку-великан? Ответ на этот вопрос дал промышленный эксперимент на металлургическом заводе в Коммунарске. Заготовки из чистой стали, полученные электрошлаковой сваркой, «показали», как обойтись без печей-«циклопов», как избежать огромных потерь «на стружку».

В чем же суть электрошлаковой сварки? Какова основа ее технологии?

Сварочная ванна, которую сварщики называют «шахтой» (почему ей дано такое название, станет ясно из дальнейшего изложения), образуется кромками свариваемых деталей и двумя поверхностями шлакоудерживающего приспособления; последними могут служить медные ползуны, охлаждаемые водой. В начальной части свариваемого стыка размещают специальное устройство (сварщики называют его «начальными планками») для возбуждения электрической дуги. Но дуга нужна

лишь для того, чтобы расплавить предварительно насыпанный в зону сварки флюс. Как только флюс расплавится, электродуговой процесс прекращается — в дуге больше нет необходимости. В расплавленный шлак ванны опускается металлический электрод. Через шлак, который при достаточно высокой температуре становится проводником, пропускают электрический ток, поддерживающий необходимый уровень температуры расплава. Под действием тепла металл электрода и основной металл кромок свариваемого изделия расплавляются и, смешиваясь, образуют металлическую ванну, которая располагается ниже более легкого шлакового расплава.

В процессе сварки шлаковая и металлическая ванны поднимаются вверх, причем последняя все время пополняется за счет плавящегося основного и электродного металла. Нижние же слои расплавленного металла затвердевают и образуют сварной шов. Он соединяет кромки свариваемых элементов и, постепенно удлиняясь, «ползет» вверх за сварочным устройством.

Здесь не случайно подчеркивается, что при электрошлаковой сварке и сварочное устройство, и шлаковая, и металлическая ванны движутся вверх. Наиболее благоприятное положение шва, свариваемого электрошлаковым методом, — вертикальное (именно поэтому-то пространство, ограниченное кромками свариваемых деталей и шлакоудерживающими медными ползунами, сварщики называют «шахтой»). Так что электрошлаковую сварку используют в основном для получения вертикальных швов — при весьма большой толщине свариваемых элементов — за один проход. В тех случаях, когда толщина уж слишком велика для обычного метода, электроду придется не простое поступательное движение снизу вверх, а более сложное: он перемещается от одной стенки шахты к другой, одновременно поднимаясь вверх.

Детали большой толщины можно сваривать также, увеличивая в соответствии с необходимостью количество электродов или используя электроды в виде толстых широких пластин (а не проволоки). Производительность электрошлаковой сварки тем выше, чем больше толщина свариваемых деталей, и ограничивается лишь определенными технологическими факторами.

Поступательное вертикальное движение ползунов, а также подача в зону сварки электродной проволоки осуществляются и регулируются специальным автоматом.

Шлаковая и металлическая ванны сохраняют при этом постоянное расположение относительно движущихся вверх ползунов.

Высокое качество шва при электрошлаковой сварке достигается благодаря особенностям процесса. Прежде всего следует отметить, что происходящие между металлом и шлаком металлические реакции значительно менее интенсивны, чем при дуговой сварке под флюсом (о ней речь пойдет дальше). Понятно, что химический состав шовного металла получается более близким к заданному. Далее, этот состав легко регулировать, поскольку имеется возможность в широких пределах изменять интенсивность оплавления основного металла и тем самым устанавливать необходимое соотношение основного и электродного металлов в расплаве, из которого формируется шов. Наконец, третье обстоятельство — в верхней части постепенно наращиваемого вертикального шва постоянно находится ванна жидкого металла. Пузырьки газа легко удаляются через него; столь же легко всплывают и частицы шлака, попадающие в металлический расплав. Так что вероятность образования пор и других неплотностей в металле шва весьма незначительна.

Большая доля тепла в процессе электрошлаковой сварки идет на нагрев кромок свариваемых деталей; околошовная зона нагревается сравнительно медленно. Благодаря этому весьма неприятная для технологов опасность образования закалочных трещин в этой зоне уменьшается, что особенно важно при сварке элементов из сталей повышенной способности к закаливанию.

Необходимо упомянуть о высокой экономичности электрошлаковой сварки. Процесс дает немалую по сравнению с дуговой сваркой экономию металла: у свариваемых кромок не приходится заделывать скосы, тем самым экономится основной металл и электродный. Рационально расходуется и электроэнергия, так как уменьшается количество флюса, который необходимо поддерживать в расплавленном состоянии в шлаковой ванне.

Сегодня электрошлаковая сварка — высокомеханизированный процесс. Советской промышленностью выпускается широкая номенклатура соответствующих аппаратов для различных работ. В принципе конструкция таких аппаратов должна предусматривать наличие устройств, которые выполняли бы следующие операции: при-

нудительное формирование шва и передвижение формирующих ползунов по мере поступательного вертикального движения шлаковой и металлической ванн; подача электродов в зону сварки; перемещение электродов в «шахте».

Устройства, формирующие швы, — отличительная особенность всякого аппарата для электрошлаковой сварки; кроме того, они снабжены особой формы мундштуками для направления электрода в зону сварки между кромками свариваемых деталей.

Основные типы аппаратов для электрошлаковой сварки отличаются друг от друга главным образом способом (и соответствующим ему механизмом) передвижения вдоль шва. Безрельсовые движутся вдоль шва прямо по свариваемому изделию, другие — по специальным направляющим, которые проложены параллельно шву (их принято называть рельсовыми). Есть и шагающие аппараты, они крепятся к изделию магнитами.

При электрошлаковой сварке к источникам питания не предъявляют особых требований. Это связано с тем, что электрошлаковая сварка фактически бездуговая (напомним, что дуга нужна только в самом начале процесса для расплавления флюса). Питание аппаратуры осуществляется от автотрансформаторов.

Выше уже говорилось, что электрошлаковая сварка дает прекрасные результаты при объединении ее в один технологический цикл с процессами литья иликовки для получения крупногабаритных конструкций. Литые конструкции больших размеров на ряде предприятий получить невозможно: не позволяют ограниченные мощности и габариты литейных цехов. Кроме того, чем отливка крупнее, тем больше вероятность возникновения в ней неоднородностей металла, что заметно снижает ее качество. Известно также, что крупные литые детали еще зачастую формируются вручную, а это очень малопродуктивный и тяжелый процесс. Сложна и окончательная механическая обработка отливок крупных размеров. И вот со всеми этими трудностями «покончила» электрошлаковая сварка: из простых отливок, которые можно получать механизированной машинной формовкой, собираются конструкции практически каких угодно форм и размеров.

Такие сварно-литые конструкции изготовляют в судостроительной промышленности (например, крупнога-

баритные элементы корпуса, вес которых нередко превышает 100 т). Уже первые опыты показали, что применение литейно-сварочного метода для производства ряда деталей корпусов судов уменьшает их стоимость по сравнению с литыми в 2 раза и более.

Электрошлаковая сварка хорошо показала себя также при создании сварно-литых элементов прокатных станков, гидравлических прессов, статоров гидротурбин, ковочно-штамповочных кривошипных прессов и т. д.

Машиностроители хорошо знают, что коэффициент использования металла при изготовлении крупногабаритных деталей методом свободнойковки и последующей обработки довольно низок. Так, слиток, из которого был выкован (а затем обточен) шестидесятичетырехтонный вал турбины для Братской ГЭС, весил свыше 220 т! Для получения ротора турбины весом 150 т приходится брать заготовку более чем в 300 т весом!

При разделении крупногабаритной детали на части, которые выковыывают и обрабатывают отдельно, а затем соединяют электрошлаковой сваркой, расход металла значительно сокращается. К тому же снижается трудоемкость процесса, упрощается технология, повышается качество изделия. Еще более значительного эффекта можно добиться, применяя для получения самих заготовок метод электрошлакового переплава.

Весьма эффективно используется электрошлаковая сварка и для исправления дефектов в отливках, для различных ремонтных работ. В Научно-исследовательском институте автогенного машиностроения в Москве создано нечто вроде «службы скорой сварочной помощи». И когда приходится ремонтировать крупногабаритные детали, специалисты используют электрошлаковую сварку. Так, на заводе «Изолит» сварщики восстановили камеру сжатия литейной машины; работа продолжалась шесть дней, а на изготовление нового узла потребовалось бы до трех месяцев. Выезжали сварщики из НИИ Автогенного машиностроения и в Литовскую ССР: в Каунасе они отремонтировали паровую турбину местной электростанции.

Контактная сварка — один из самых технически оснащенных методов соединения материалов. В настоящее время особенно широко применяются, детально разработаны и оснащены три вида контактной сварки — стыковая, шовная (или роликовая) и точечная.

Контактно-стыковая сварка оплавлением используется для соединения узлов и элементов конструкций из чугуна, углеродистых и легированных сталей, сплавов, цветных металлов. Таким методом свариваются рельсы и стыки толстостержневой арматуры, листовой металл и стержневые заготовки клапанов автомобильных двигателей, трубы и многое другое.

В строительстве магистральных трубопроводов особое значение она приобрела после того, как Институт электросварки им. Е. О. Патона создал принципиально новый способ стыковой сварки оплавлением — с использованием кольцевых трансформаторов. Сердечник таких трансформаторов охватывает подлежащее сварке изделие по всему периметру. Вторичная их обмотка, которая состоит из нескольких параллельных витков, подводится непосредственно к изделию. В результате сварочный ток равномерно распределен по сечению изделия. Это очень важно для сварки изделий большого сечения, какими и являются трубы магистральных нефте- и газопроводов. Кроме того, кольцевые трансформаторы способствуют увеличению интенсивности оплавления свариваемых кромок, что значительно ускоряет и удешевляет процесс. По сравнению с обычными стыковыми сварочными устройствами системы с контурным сердечником потребляют в несколько раз меньше мощности.

Как же практически осуществляется сварка трубопроводов стыковым методом?

Контактно-стыковой трубосварочный агрегат установлен на тракторе. Здесь же смонтирована стрела, на которой подвешивается кольцевой трансформатор. Такая установка передвигается по трассе прокладки магистрального трубопровода от стыка к стыку. Трубоукладчик располагает новый отрезок трубы в стык к предыдущему. В нужное место трансформатор подается стрелой. Включается ток, стыкуемые торцы труб интенсивно оплавляются; одновременно осадочный механизм сжимает их. Когда плеть достигнет заданной длины, ее укладывают в траншею.

На предприятиях машиностроительной, приборостроительной и электронной промышленности широко применяется точечная контактная сварка (в том числе и точечная микросварка). Этот вид сварки также хорошо оснащен различными машинами и механизмами, что позволяет добиться высокой производительности. Напри-

мер, подвесные машины для точечной сварки. Их часто используют в комплекте. Тогда изделие с большой свариваемой площадью обрабатывается одновременно не одним, а несколькими сварочными механизмами, что значительно повышает производительность труда, убыстряет технологический процесс.

Для точечной контактной сварки малоуглеродистой стали отечественная промышленность выпускает целое «семейство» машин типа МТП (для сварки изделий большой толщины). А детали из нержавеющей стали надежно свариваются при помощи машин типа МГПР. Полезный вылет аппаратов свыше 3 м, это позволило освоить крупногабаритные изделия. Электроды в таких машинах имеют радиальный ход, что удобно в эксплуатации.

В тех случаях, когда какие-либо детали и узлы по тем или иным причинам не могут быть перенесены к стационарным машинам точечной сварки, применяют портативные сварочные клещи разных типов и мощностей. Удачна конструкция сварочных клещей Института электросварки им. Е. О. Патона. Сравнительно малый вес, удобное соединение с малогабаритным трансформатором, система водяного охлаждения, небольшая потребляемая мощность, высокая производительность — таковы особенности этого замечательного инструмента.

Большой эффект в повышении производительности сварочных процессов дает использование машин для многоточечной сварки, получивших широкое распространение в ряде отраслей машиностроения. Эти машины узкоспециализированы, строго приспособлены к определенным изделиям, к их габаритам и конфигурации, что при многосерийном производстве вполне оправдано: они сваривают десятки тысяч точек в час. Второе их важное достоинство в том, что в одном положении, не перемещая изделие, можно сваривать самый сложный профиль. Такие профили при небольшой толщине материала часто коробятся, когда их перемещают в процессе сварки. При использовании же многоточечных контактных сварочных машин этого не происходит и изделия не нуждаются в дополнительной правке.

Тепловозы и электровозы, автомобили и сельскохозяйственные машины, пакеты статоров и ряд других изделий сейчас изготавливают способом многоточечной сварки. Для столь широкого диапазона технологических

процессов нужна и достаточно обширная номенклатура сварочных аппаратов. И она создана в отечественных институтах, из которых особо надо выделить Всесоюзный научно-исследовательский институт электросварочной промышленности (ВНИИЭСО).

Машины этого типа (как, впрочем, и упомянутые выше другие системы точечной контактной сварки) снабжены различными средствами автоматизации сварочных процессов. Электронные устройства, изменяющие ток по заданной программе; работающие по определенным программам разнообразные регуляторы времени сварки; системы автоматического регулирования, снабженные датчиками, чутко реагирующими на тепловое расширение ядер сварных точек, и т. д. — всего не перечтешь.

Говоря о точечной контактной сварке, следует особо отметить производство арматуры для железобетонных конструкций. Изготовление арматурных изделий долгое время не носило индустриальный характер: сначала арматуру «ввязали», а потом научились сваривать, но лишь ручной сваркой. Внедрение точечной сварки позволило создать поточные линии по изготовлению арматуры. В результате сократилась трудоемкость операций, снизилась стоимость работ, улучшилось качество сварной арматуры, уменьшились сроки строительства крупных сооружений — гидротехнических и др.

Эффект индустриализации изготовления арматуры тем более велик, что размеры ее производства и потребления в нашей так много строящей стране поистине огромны: за год у нас сваривают миллионы монтажных стыков арматурных стержней. В СССР работает множество автоматических линий точечной сварки разнообразных плоских и рулонных сеток, еще больше автоматов, соединяющих арматуру из стержней сравнительно большого диаметра, тысячи машин для контактной сварки пространственных каркасов и сеток.

Еще один вид контактной сварки — шовная, или роликовая. Она успешно применяется в различных отраслях индустрии — вагоностроительной, автомобильной, для производства всевозможных емкостей, кожухов и т. д. Для шовной контактной сварки советская промышленность выпускает разного рода машины в зависимости от типа свариваемых изделий и материала.

В отличие от точечной шовная контактная сварка ведется непрерывно. В качестве электродов применяют

ролики (отсюда и название — роликовая), между которыми протягивается свариваемый стык.

Для ускорения процесса роликовой сварки Институт электросварки им. Е. О. Патона разработал особый способ, так называемый рельефный. Заключается он в следующем. На одном из свариваемых листов формируется рельеф; в том месте, где его вершина соприкасается со вторым листом, плотность тока значительно увеличивается. Ускорение местного нагрева металла способствует повышению скорости сварки. Интересные машины-автоматы для роликовой сварки выпускаются в США, ЧССР, ГДР, Франции и других странах. Среди них есть и специализированные, предназначенные, например, для автомобильной или авиационной промышленности, и универсальные. Лучшие образцы снабжены гидравлическим приводом электродов и электронными системами автоматического управления.

Разновидность контактной сварки — импульсная сварка сопротивлением. Перспективные работы в этой области ведутся и в нашей стране, и за рубежом. Так, по сообщению американской прессы компания «Канта Уэлдинг» в штате Мичиган выпускает автоматы «ультрапале» для импульсной сварки сопротивлением. Ток в них почти в 10 раз превышает ток в обычных сварочных агрегатах; зато время сварки составляет тысячные доли секунды. Теплота не распространяется за пределы сварочной зоны. Благодаря этому улучшается качество шва и не возникает вредного влияния нагрева на смежные со швом области.

Импульсная сварка широко применяется и в нашей стране; самый распространенный способ — конденсаторный, разработанный в Институте электросварки им. Е. О. Патона, МВТУ им. Баумана, Киевском политехническом институте и других научно-исследовательских центрах. Весьма интересна система машин для контактной стыковой сварки сопротивлением. Она создана специалистами Института электросварки им. Е. О. Патона и предназначена для соединения изделий большого сечения (свыше 10 тыс. мм²) из алюминиевых сплавов.

Суть импульсной сварки сопротивлением, видимо, не требует подробных разъяснений: к свариваемому стыку подводят электрический ток; по известному закону выделяется теплота, свариваемые кромки нагреваются и

свариваются; ток подается кратковременными импульсами, в результате чего нагрев не оказывает вредного побочного воздействия на материал.

Интересная разновидность указанного метода — широко применяемая в микроэлектронике сварка давлением с косвенным импульсным нагревом. Здесь импульсами тока нагревается инструмент (пуансон), который, в свою очередь, одновременно нагревает соединяемые элементы и оказывает на них давление. В то же время происходящие в материале физические процессы позволяют отнести сварку давлением с косвенным импульсным подогревом к группе методов диффузионной сварки (об этом речь впереди).

Сварка давлением с косвенным импульсным нагревом V-образным электродом была предложена советскими специалистами еще в 1964 г. С тех пор она прочно вошла в практику радиоэлектронной промышленности. Этим методом соединяют золотые, алюминиевые и медные проводники с алюминиевой, медной, золотой и серебряной пленкой, с полупроводниковыми элементами. Широко используется метод при монтаже интегральных и гибридных микросхем.

Из установок для сварки давлением с косвенным импульсным нагревом назовем отечественные системы СКИН и Контакт и американскую установку фирмы «Welttek Div». Имеются системы сравнительно широкого диапазона применения и системы узкой целенаправленности. Например, установка «Контакт-3А» предназначена для монтажа в гибридных тонкопленочных схемах.

Дуговая сварка. Этот вид сварки, его история, описание многообразной сферы применения могли бы стать темой специальной книги — и не маленькой брошюры, а солидного, объемистого, даже многотомного издания. Мы же остановимся здесь на двух наиболее перспективных способах — на автоматической дуговой сварке под флюсом и на дуговой сварке в среде защитных газов.

При автоматической дуговой сварке под флюсом электрическая дуга между металлическим электродом и свариваемым изделием горит под слоем специального сыпучего вещества — флюса. Под действием выделяемого тепла часть флюса расплавляется и образует на поверхности металлического расплава шлаковый покров. Он-то и защищает металл от вредного воздействия воздуха. Металл не разбрызгивается и не выго-

рает; кроме того, флюс способствует концентрации тепла, препятствует его рассеиванию. Благодаря этому плавящее воздействие дуги значительно возрастает; эффективное использование тепла позволяет экономить немало электроэнергии. При автоматической сварке под флюсом можно применять большие сварочные токи.

Важное преимущество данного вида сварки в том, что защищенный флюсом расплавленный металл остывает медленно, что создает хорошие условия для формирования шва, из которого успевают выделиться большая часть шлака и газов.

Однако главное достоинство сварки под флюсом — метод позволил автоматизировать сварочный процесс, перевести на поток изготовление многих сварных конструкций. Внедрение в производство автоматической сварки под флюсом в корне изменило, например, технологию промышленного изготовления котлов и корпусов судов, различных металлоконструкций, тонкостенных труб большого и малого диаметра и т. д.

Мы уже говорили, что сварка под флюсом позволила автоматизировать процесс изготовления тонкостенных труб, в частности тонкостенных труб большого диаметра для магистральных трубопроводов (напомним, что для их изготовления применяются также методы контактной сварки, о которой рассказывалось выше). Эти трубы изготавливают в настоящее время двумя основными способами — сваркой продольной и по спирали. Первый способ, разработанный в Институте электросварки им. Е. О. Патона, позволил создать мощные трубосварочные станы, на которых автоматическая сварка под флюсом осуществляется с большими скоростями. Такие трубосварочные станы по изготовлению прямошовных труб большого диаметра работают на многих заводах страны.

Метод автоматической сварки под флюсом труб спиральным швом был впервые предложен сотрудниками ЦНИИТмаша. Здесь же была разработана конструкция специального трубосварочного стана, состоящего из двух частей — формовочного и сварочного автоматов. Оба агрегата работают непрерывно, сварка производится в два слоя — двумя головками, расположенными на расстоянии одного шага спирали друг от друга. С внутренней стороны трубы шов формируется на медной основе («подушке», как говорят сварщики).

Важное преимущество метода спиральной сварки труб в том, что он позволяет из узкой металлической ленты сваривать трубы любого диаметра. Кроме того, в спирально сваренной трубе шов испытывает значительно меньшую нагрузку, чем в продольно сваренной.

Сварка под флюсом нашла применение и на строительстве трубопроводов. Для этой цели Институтом электросварки им. Е. О. Патона и ВНИИ строительства трубопроводов была разработана и создана специальная сварочная аппаратура.

Раньше непосредственно при прокладке трубопровод сваривался из отрезков труб длиной примерно по 10 м каждый. Согласно же новой технологии доставленные к месту строительства трубы попадают на одну из расположенных вдоль трассы строительства баз, оснащенных полустационарными установками для автоматической сварки под флюсом. Здесь их соединяют в секции длиной примерно 25 м и отправляют к месту укладки. Там их ждут полуавтоматические сварочные устройства, энергия к которым подается от передвижных электрогенераторов. С помощью этих аппаратов секции свариваются в двухсотметровые «плетки». Количество стыков, свариваемых вручную, уменьшилось до 5% от общей длины сварных швов.

Сварка под флюсом широко применяется на предприятиях разных отраслей машиностроения. С ее помощью изготавливают узлы буровых установок, шагающих экскаваторов, прокатного оборудования, тепловозы, цистерны, котлы, подъемно-транспортные машины, воздухонагреватели и т. д.

Теперь мы кратко остановимся на том оборудовании, с помощью которого осуществляется процесс автоматической сварки под флюсом.

Прогрессивная система, используемая в сварочном деле, — так называемый сварочный трактор (автоматическая сварочная головка, которая смонтирована на самоходной тележке с собственным электродвигателем). Аппарат хорошо работает при сварке резервуаров нефти, больших плоских секций, длинных балок, металлических сосудов большого диаметра и пр. Сварочные тракторы могут передвигаться по специальному переносному рельсу, который укладывается вдоль шва перед началом сварочной операции, и непосредственно по свариваемому изделию.

Отечественная промышленность выпускает ряд моделей сварочных тракторов, которые позволяют автоматизировать многие операции при сварке изделий под флюсом. Это и универсальные агрегаты, и специализированные для выполнения какой-то одной определенной операции. Производство последних также вполне оправдано, так как на многих предприятиях сварочные работы ведутся непрерывно и в больших масштабах.

Существенно важный узел всякой установки для автоматической дуговой сварки под флюсом — автоматическая сварочная головка. Ее назначение в том, чтобы зажигать электрическую дугу, обеспечивать ее ровное, стабильное горение и постоянную длину, подавать электродную проволоку. Скорость подачи проволоки в наиболее распространенных зарубежных конструкциях автоматических головок регулируется электродвигателем. Он связан электрической цепью с дугой так, что изменение напряжения последней вызывает увеличение или уменьшение числа его оборотов, а это, в свою очередь, меняет скорость подачи проволоки.

Автоматические головки используют не только как часть сварочного трактора, о котором речь шла выше, но и непосредственно — в виде так называемых подвесных и самоходных сварочных головок.

Подвесные головки бывают двух видов: для тех случаев, когда при сварке изделие закреплено, — подвижные, если же изделие перемещается — неподвижные. Для сварки продольных швов используют подвижные подвесные головки (они устанавливаются, например, на велосипедных тележках). Кольцевые же сварные швы — различная нефтеаппаратура, паровые котлы и пр. — получают с помощью неподвижных подвесных головок (в этих случаях вращается само изделие).

Самоходные головки оснащены движущим механизмом. Одна из важнейших сфер их применения — автоматическая сварка под флюсом длинных балок. Самоходные сварочные головки используются также для сварки внутренних кольцевых швов при изготовлении объемов большого диаметра.

Скорость подачи электродной проволоки и скорость перемещения головки регулируются плавно, бесступенчато. К тому же скорость движения головки можно менять, не изменяя скорости подачи электрода, что дает возможность варьировать соотношение скоростей, доби-

ваясь тем самым технологически необходимого режима сварки.

Упомянутыми выше сварочными тракторами и автоматическими головками парк механизмов, применяемых для дуговой сварки под флюсом, не исчерпывается. Имеется ряд других сварочных автоматов и полуавтоматов. Особый интерес представляют системы для двухдуговой сварки, технология которой была впервые в мире разработана сотрудниками Института электросварки им. Е. О. Патона. Известно, что при однодуговой сварке дуга между электродом и изделием как проплавляет основной металл, так и формирует шов. При двухдуговом же способе эти функции выполняют две дуги. Первая (между вертикально расположенным электродом и изделием) проплавляет металл, вторая (между наклонным к шву электродом и изделием) формирует шов. Вторая дуга участвует и в проплавлении основного металла.

Ясно, что в каждой дуге при двухдуговой сварке можно использовать более слабый ток, чем при однодуговой. Больше того, распределение функций позволяет добиться положения, когда обеим дугам даже в сумме нужен меньший электрический ток, чем при сварке одной дугой. В то же время метод позволяет значительно повысить скорость сварочного процесса. Для двухдуговой сварки можно использовать и специальные сварочные аппараты, головка которых располагает двумя электродами, и два несложных однодуговых автомата. В последнем случае оба электрода — вертикальный и наклонный — должны перемещаться последовательно и синхронно, сохраняя постоянное расстояние между собой.

Перспективна сварка двумя электродами с питанием трехфазным током. Такая сварка позволяет повысить производительность, экономить электроэнергию, равномерно загружать электросеть. Технический смысл и специфика данного метода заключаются в том, что в сварочном аппарате горят три дуги: между электродами и между каждым из них и свариваемым изделием. Две дуги проплавляют металл и расплавляют электродную проволоку; дуга между электродами способствует быстрому расплавлению электродного металла. В том случае, если одна из двух основных дуг погаснет, дуга между электродами автоматически гасится специальным

магнитным контактором. Зажигается она тоже автоматически — как только электрод соприкоснется с основным металлом.

Достоинство метода еще и в том, что можно в существенных масштабах перераспределять энергию между электродами и изделием. Изменяя ток в каждой из трех фаз, сварщик получает возможность регулировать процесс так, чтобы расплавление электродного и основного металла осуществлялось, как того требуют характеристики свариваемых металлов или сплавов. Можно повысить ток в дуге между электродами, не увеличивая, и даже уменьшив при необходимости, ток в дугах между электродами и изделием. В этом случае электроды расплавляются значительно быстрее, нежели проплавляется основной металл, и возрастает скорость наплавки.

Простота регулировки теплового режима при сварке трехфазной дугой позволила применить метод для получения сварных конструкций из специальных сталей. Ценно и то, что сварные швы при трехфазной электродуговой сварке обладают отличными механическими свойствами: высоким пределом прочности, хорошей ударной вязкостью, большим углом загиба и т. д.

Сварка трехфазной дугой может быть и ручной, и автоматической. Высокопроизводительная автоматическая трехфазная дуговая сварка под флюсом впервые разработана в нашей стране. Создана и аппаратура для нее. Автоматы для сварки трехфазной дугой под флюсом сконструированы коллективами Института электросварки им. Е. О. Патона, ЦНИИ технологии машиностроения и других научных организаций.

В ряде случаев совершенно необходимо осуществлять вертикальную сварку. Мосты и каркасы домов, корпуса кораблей, кожухи доменных печей и воздухонагревателей — без вертикальных сварных швов не обойтись. И снова на помощь производственникам и строителям пришел Институт электросварки им. Е. О. Патона. Здесь был создан способ вертикальной автоматической дуговой сварки под флюсом. Институт разработал и конструкцию специального устройства, охлаждаемого водой, с помощью которого принудительно формируется вертикальный шов.

Сварочная головка, оснащенная таким охлаждаемым формовочным устройством, движется снизу вверх, оставляя за собой ровный шов, который, как оказалось, обла-

дает повышенными механическими свойствами по сравнению со швом, полученным при горизонтальной сварке. Сварщикам хорошо известно, что при горизонтальной сварке деталей значительной толщины за один проход в остывающем в сварочной ванне расплаве образуются столбчатые кристаллы, растущие от боковых поверхностей к середине ванны. Встречаясь, они образуют стык; именно здесь при нагрузке и появляются трещины.

В вертикальном сварном шве кристаллы растут вдоль стен ванны. И поскольку стык кристаллов не образуется, нет и области, которая снижает прочность всего шва. Кроме того, ускоренный отвод тепла формовочным устройством благоприятно влияет на охлаждение шва; это также повышает его механические свойства. Наконец, вместе с ползущим вверх сварочно-формовочным устройством постепенно движется в том же направлении и расплавленный металл в сварочной ванне. Он все время находится в жидком состоянии, благодаря чему создаются условия для выхода газов, которые образуются в процессе сварки. (Заметим, что вертикальные сварные швы могут быть получены также электрошлаковой и контактной сваркой, с которыми мы уже познакомили читателя.)

Сварочные тракторы и другие автоматы можно применить далеко не везде. Они непригодны, например, для получения швов в труднодоступных местах конструкции и сварных швов по сложным кривым, невыгодны при сварке коротких швов. Именно для таких целей и была разработана шланговая полуавтоматическая дуговая сварка под флюсом тонкой электродной проволокой. Ее суть заключается в следующем. Сварка ведется пистолетом-держателем, который находится в руке сварщика. От держателя тянутся гибкие шланги особой конструкции длиной в несколько метров. По этим шлангам к сварочному пистолету подаются электродная проволока и флюс. Важно, что гибкие шланги придают системе маневренность и сварщик может работать в самых разнообразных положениях. Иными словами, метод соединяет в себе ряд преимуществ автоматической сварки и маневренности ручной. Однако он не производительен и в ряде случаев его применение нерентабельно.

Защитные газы используются не только при дуговой сварке, но, например, и при контактной. Но главная область их применения в качестве среды, защищающей

свариваемый шов,— все-таки дуговая сварка. Для этой цели могут служить различные газы; наиболее распространены аргон (или аргоно-гелиевая смесь) и углекислый газ.

При аргоновой и аргоно-гелиевой дуговой сварке защитный газ вводится в зону дуги струей, которая проходит вдоль электрода, окружая его. Струя надежно предохраняет расплавленный металл шва от образования окислов. Преимущества метода в высокой производительности, высоком качестве шва, в отсутствии необходимости зачищать шов (нет флюса — нет и шлака), в маневренности (в связи с малым весом сварочных горелок-пистолетов), в универсальности (способ позволяет сваривать многие металлы) и т. д.

В СССР создано несколько типов автоматов и полуавтоматов для сварки в защитной среде инертного газа. Весьма производительны, например, автоматы для сварки неповоротных стыков труб различного диаметра. Они крепятся на трубе специальным зажимом, а сварочная головка описывает вокруг трубы полный оборот, оставляя за собой прочный и ровный шов. Движение, как и подача электродной проволоки, совершается автоматически. Помимо специализированных, выпускаются и универсальные установки для электродуговой сварки в защитной среде инертных газов.

По сравнению с аргоно-дуговой сварка в защитной среде углекислого газа имеет ряд преимуществ. Главное из них — значительно более низкая стоимость процесса, поскольку сам углекислый газ намного дешевле аргона. При этом сохраняется высокая производительность, а полученные швы обладают хорошими механическими качествами. Правда, дуговая сварка в среде углекислого газа требует специальной защиты сварщика от вредных излучений дуги, мер против разбрызгивания расплавленного металла, против науглероживания металла шва и образования на его поверхности окисной пленки. Но это — трудности вполне преодолимые.

Специальное механическое устройство подает плавящуюся электродную проволоку в зону сварки; сюда же поступает и поток углекислого газа — от баллона по гибкому шлангу. По пути в современных сварочных установках углекислый газ проходит через осушитель и в ряде случаев — через электрический нагревательный элемент. Аппарат для сварки может быть также осна-

щен системой водяного охлаждения. Однако в полуавтоматах, предназначенных для работы в условиях монтажной площадки, эта утяжеляющая система не нужна (а зимой она даже создает дополнительные трудности). Так что ими снабжаются не все аппараты.

Системы, осуществляющие сварку в углекислом газе, иногда снабжают двумя сварочными головками, между которыми перемещаются детали. Сравнительно короткие прямолинейные швы (несколько метров длиной) могут соединяться автоматами, в которых головка устанавливается на самодвижущейся тележке. Полуавтоматические и автоматические установки снабжают также устройствами, которые при включении тока сразу же прекращают подачу газа и электродной проволоки.

Способ помог механизировать монтажную сварку кольцевых стыков толстостенных трубопроводов высокого давления, требующих надежного шва. Новая технология и аппаратура для этой цели были разработаны сотрудниками Института электросварки им. Е. О. Патона совместно с работниками треста «Южтеплоэнергомонтаж». Уже на первых объектах, где применялся новый метод, он показал себя как очень рациональный и перспективный.

В процессе сваривания углекислый газ оттесняет воздух из зоны сварки и защищает металл от его воздействия. Однако он и сам может ухудшить качество свариваемого шва. Чтобы этого не случилось, применяют электродную проволоку, содержащую достаточное количество раскислителей.

В современной технике и производстве встречаются процессы, когда ни один из выше описанных методов сварки непригоден или по крайней мере очень невыгоден. Сварщики нашли выход и из этого положения, разработав еще один способ дуговой сварки — полуавтоматическую сварку открытой дугой. Это название звучит несколько неожиданно, не правда ли? До сих пор мы все время говорили о защите зоны сварки, и вдруг — открытая дуга. Но название «открытая» несколько условно. Просто защитные вещества, а также вещества, улучшающие качество шва, введены непосредственно в электродный металл. Первоначально для этой цели применяли порошковую проволоку — тонкую трубку, наполненную необходимыми добавками, которые предварительно размалывались в достаточно тонкий порошок. Позднее

ее заменила сплошная электродная проволока, в состав которой в качестве соответствующих примесей вводились вещества, защищающие дугу и улучшающие механические показатели шва.

Особую сложность вопросу о защите зоны сварки придает необходимость осуществлять в определенных случаях сварку под водой. Эта проблема была решена советским ученым К. К. Хреновым с помощью классического приема — обмазки электродов специальным составом. При горении дуги обмазка, испаряясь, создает газовую сферу, которая и защищает зону сварки: газовый «пузырь» оттесняет воду. Метод Хренова дает возможность ремонтировать подводную часть судна, не вводя его в сухой док, чинить трубопроводы, проложенные по дну рек, каналов, озер, и т. п.

Классические методы сварки, широко применяемые и сейчас, основаны на расплавлении металла. А нет ли принципиально иного способа сварки? Есть, и не один. Рассказ о них — в следующей главе.

Сварка трением, сварка взрывом, диффузионная сварка

Сварка трением. Вред, причиняемый выделением тепла при трении, хорошо известен. Его результатом могут быть преждевременный износ деталей машин, а иногда и серьезные аварии. Инженерная мысль издавна искала возможности преодолеть последствия этого. Но нашелся человек, мысль которого пошла по другому пути — по пути поиска методов полезного применения вредного явления. Таким человеком был токарь А. И. Чудиков. В 1956 г. он подал заявку на изобретение. В ней говорилось: «сварка металлов трением».

Первое сварное соединение А. И. Чудиков получил на обычном токарном станке. Одна из двух свариваемых деталей неподвижно закреплялась в патроне передней бабки, другая — непосредственно в суппорте станка. Затем торцы деталей прижимались друг в другу, и шпиндель станка приводился во вращение. Уже через несколько секунд свариваемые поверхности и примыкающие к ним области нагревались докрасна, вращение

шпинделя прекращали — и детали оказывались прочно сваренными.

Работой изобретателя заинтересовались во Всесоюзном научно-исследовательском институте электросварочного оборудования. Эксперименты, проведенные вместе с А. И. Чудиковым, подтвердили плодотворность идеи. Начались серьезные и многоплановые работы по созданию оборудования для использования нового процесса сварки в практике.

Во время исследований были выявлены новые ценные качества сварки трением, в том числе ее высокий к. п. д. и высокая производительность; гигиеничность; возможность соединения разнообразных (в том числе и разнородных) материалов — чистых металлов и сплавов. Одновременно опыты показали, что новый процесс, на первый взгляд такой простой, представляет собой весьма сложное явление (вернее, целый комплекс сложных явлений) и что для внедрения его в практику нужно решить много разнообразных задач.

Во ВНИИЭСО проблемой занималась группа сотрудников во главе с кандидатом технических наук В. И. Виллем. Позднее к работе подключились ЦНИИ технологии машиностроения, НИИ тракторного и сельскохозяйственного машиностроения, Минский тракторный завод, завод «Фрезер» и другие предприятия и научно-исследовательские учреждения. Результатом всех этих усилий было, по сути дела, рождение принципиально новой области техники.

Уже к концу 60-х годов советские специалисты создали большую «семью» различных специальных и универсальных полуавтоматов и автоматов для сварки трением. Было организовано серийное производство такого оборудования. Новый метод и разработанная для него технология, позволяющая сваривать трением сотни наименований разнородных материалов, были внедрены и успешно используются на предприятиях многих отраслей индустрии.

Особенно большой эффект сварка трением дает в инструментальной промышленности благодаря высокой производительности процесса, значительному снижению расхода ценной быстрорежущей стали, высоким характеристикам соединения, удобству для автоматизации.

Вслед за Советским Союзом сваркой трением занялись специалисты в США, Англии, Японии. Советские

ученые, продолжающие исследования в этой области, ведут дальнейшие разработки совместно со специалистами ЧССР, ГДР, Польши и других стран социалистического содружества. За рубежом сварку трением часто называют «русской сваркой». Против такого названия может быть лишь одно возражение: основа не только этого, но и почти всех видов сварки, о которых уже рассказано в этой брошюре или будет рассказано в последующих ее главах, разработана осветскими учеными.

Сварка взрывом. Применение взрыва в качестве технологического приема связано с непрерывной разливкой стали. Среди других трудностей, мешавших внедрению этого прогрессивного процесса, была одна, с которой и помог справиться взрыв.

Технологи никак не могли найти способ быстро и без потерь разрезать ползущий раскаленный слиток. На опытных установках непрерывной разливки это делали с помощью газовых резаков. Такие резаки укреплялись на тележке, тележки сцеплялись со слитком, устройство на ходу разрезало слиток, а потом возвращалось назад, в исходную позицию. Однако способ был весьма несовершенным, явно снижал производительность установки непрерывной разливки, требовал больших затрат газа, бесполезно сжигал немало металла. И, что особенно важно, газовые резаки не справлялись с некоторыми сортами металла.

Вот тогда-то в Харьковском авиационном институте и попытались применить для резки слитка взрыв, вернее, выстрел. Там взяли старую авиационную пушку, приделали к снаряду «секиру» и испытали устройство на Ново-Тулском металлургическом комбинате. Выстрел — и слиток любой толщины и из любой стали рассекается надвое; ни секунды задержки, ни грамма отходов. Резку взрывом используют для обрубки прибылей, для резки листового проката, балок, швеллеров, уголков, труб.

Взрывная технология используется для прессования стружки и металлолома: взрыв уплотняет брикет почти до предела, что дает огромную экономию при перевозке и загрузке шихты в печь. Энергию взрыва можно использовать для прессования изделий из порошков, для очистки литья от формовочной земли, пригара и окалины, для упрочнения деталей наклепом. Великолепные перспективы открыла перед машиностроением и металлообработкой и взрывная штамповка. Во всех случаях

взрывная технология сопровождается упрощением оборудования, новыми возможностями в обработке материалов, экономией средств и времени, повышением точности и скорости. Секрет успеха в том, что обработка ведется на молекулярном уровне.

Существенными преимуществами обладает и сварка взрывом. Ее разработали в Институте гидродинамики Сибирского отделения АН СССР. Преимуществ у взрывной сварки немало, но главная из них, пожалуй, в том, что она позволяет соединять очень большие площади, причем быстро и без специального сложного оборудования. Представим себе, что нам необходимо надежно сварить две большие пластины. Как в этом случае работает взрыв?

Одну из пластин кладут на тяжелую плиту, вторую располагают над первой под небольшим углом к ней — с помощью тонких опорных стоек. На верхнюю пластину укладывают взрывчатое вещество, распределяя его ровным слоем. Чтобы давление взрыва на плиту было равномернее, под взрывчатку кладется кусок резины. Ближе к вершине угла ставится детонатор. Удар по капсюлю — пластина превращается в одно целое.

Происходит это так. Вершина угла «бежит» вдоль соединяемых поверхностей со скоростью детонации, и точки этих поверхностей, находящиеся в каждый данный момент в вершине угла, соударяются. При этом из вершины угла выдуваются и грязь и окисные пленки.

Рассмотрим процесс глубже. Задача не из легких, если учесть огромную скорость процесса, но решить ее можно. Сверхскоростная рентгеновская съемка показывает, что после соприкосновения по внутренней поверхности пластин со скоростью 5 км/с мчится ударная волна; за волной стремятся точки соприкосновения. Решающее влияние на сварку оказывает величина угла между пластинами. Если угол будет меньше $2-4^\circ$, точки соприкосновения перегоняют звук, микроволнистая поверхность не образуется; если угол окажется больше, листы сдвинутся. И в том и в другом случае листы не сварятся.

Но какая все же это сварка? Диффузионная? Нет, для диффузии времени не хватает, не образуется ни переходных соединений, ни промежуточных структур. Соединение в данном случае — результат действия межатомных сил сцепления. Любопытно, что соединение всегда

прочнее материалов пластин. Это объясняется наклепом тонких слоев металла при пластической деформации.

Перспективы сварки взрывом представляют весьма обширными. Ею можно пользоваться при изготовлении биметаллических листов, при наплавке и восстановлении изношенных изделий, при соединении разнородных металлов. Сварке взрывом подвластны даже такие «неуживчивые» пары, как, скажем, медь и золото, сталь и серебро, сталь и цирконий.

Выше говорилось, что важнейшее достоинство сварки взрывом — способность соединять большие поверхности. Но применяется она — и с успехом — также и для микроопераций. В одном радиоэлектронном приборе используется деталь, которая состоит из почти полутора тысяч шестигранных медных ячеек с отверстием диаметром 0,7 мм и толщиной стенок до 50 мкм. Инженеры долго ломали себе голову над тем, каким методом изготовить такие «микросоты».

Выручил взрыв. Инженеры взяли нужное количество отрезков алюминиевой проволоки, покрыли их — методом электролиза — медной пленкой, стянули из них жгут и запрессовали его в медную трубку. Потом трубку обложили взрывчаткой и взорвали ее. Когда затем алюминий был удален химическим путем, в руках у инженеров оказались надежно сваренные «соты» — то самое искомое изделие, которое долго «не давалось в руки».

Развивается и взрывная сварка больших поверхностей. Уникальные работы в этой области выполняет Алтайский научно-исследовательский институт машиностроения. Разработанная здесь технология сварки взрывом уже нашла применение при решении важных народнохозяйственных задач. В новом качестве взрыв послужил при облицовке турбин для самых мощных гидроэлектростанций (в частности, Братской и Красноярской). Метод сварки взрывом взят на вооружение ленинградцами (завод «Электросила»), свердловчанами (завод «Уралхиммаш») и т. д.

Следует отметить, что сварка взрывом крупных поверхностей пока осуществляется в основном на полигонах. Однако в настоящее время лаборатория импульсной технологии и новых материалов Алтайского НИИ машиностроения успешно работает над созданием обо-

рудования, которое позволит вести этот процесс в заводских условиях.

Диффузионная сварка в вакууме. Выше мы говорили о том, что при сварке применяются различные методы защиты сварочной зоны, без чего соединение не получалось бы достаточно надежным. Для этой цели используются флюсы, газы, шлаки. А что является вообще самой лучшей, идеальной защитой, в какой среде материалы или процессы наилучшим образом застрахованы от посторонних воздействий? Ответом на этот вопрос стало предложение осуществить сварку в вакууме. Наиболее плодотворное использование идея, пожалуй, получила в методе диффузионной сварки в вакууме, разработанном профессором Н. Ф. Казаковым.

Несколько слов о сути процесса диффузии, положенного в основу нового метода.

Как читателю, очевидно, известно, в металлофизике есть такой термин — «твердые растворы». Они — результат диффузии в твердых телах. Тепловые колебания атомов вещества могут достигнуть таких амплитуд, что они (атомы) покидают свои места в кристаллической решетке. Там остается свободное, или, как его называют, «вакантное» место. Такие свободные места занимают другие атомы. Если «новый» атом из основного металла, говорят о самодиффузии; если из другого вещества — о гетеродиффузии. В этом случае и возникает твердый раствор замещения.

Для осуществления диффузионной сварки необходимо сблизить сварочные поверхности настолько, чтобы они оказались в радиусе взаимодействия межатомных сил. Однако при простом соприкосновении поверхностей процесс взаимной диффузии не произойдет — необходимо приложить к соединяемым поверхностям определенное сжимающее их усилие.

Усилие, т. е. величина удельного давления на контактирующие поверхности, — одно из основных средств управления процессом диффузионной сварки. Здесь следует отметить, что прочность соединения повышается только до определенной величины удельного давления. Дальнейшее усиление сжатия контактирующих поверхностей может даже снизить прочность сварного соединения. То же самое можно сказать о другом методе управления процессом диффузионной сварки — о предварительном нагреве свариваемых элементов, благодаря

чему растет термическая подвижность атомов. Как показали эксперименты, сначала повышение температуры увеличивает прочность соединения, а выше определенных пределов оно даже разупрочняет соединение из-за ускоренного роста зерен.

Еще одно действенное средство управления процессом диффузионной сварки — предварительная подготовка поверхностей свариваемых деталей. Прежде всего это механическая обработка. Здесь может идти речь о выборе из богатого арсенала методов. Опыт показал, что черновое течение менее эффективно, чем тонкое получистовое (при одном и том же удельном давлении). Наоборот, шлифование часто снижает прочность соединения по сравнению с тонким получистовым течением. Это, видимо, связано с тем, что при абразивной обработке на зачищаемые поверхности металла попадают продукты разрушения абразива, и эти твердые частицы препятствуют диффузионным процессам. Еще более высокий уровень обработки — полирование — вновь повышает качество диффузионного соединения.

Однако механическая обработка — лишь первый этап подготовки поверхностей. Вслед за ней необходимо удалить с них все то, что препятствует оптимальному контакту: масла и пыль, жиры, краски, грязь, адсорбированные пленки и т. д. С этой целью применяются различные методы протирки — спиртом, ацетоном, четыреххлористым углеродом: прокаливание в вакууме; травление кислотами и щелочами.

Наконец, еще один вопрос по поводу технологии процесса диффузионной сварки в вакууме — о степени разрежения в рабочей вакуум-камере и продолжительности вакуумирования. При его решении необходимо учитывать ряд моментов.

С увеличением времени сварки прочность соединения растет до показателей прочности основного металла; дальнейшее увеличение на прочность сварного соединения влияния уже не оказывает; больше того, чрезмерное время выдержки может даже привести к снижению прочности соединения из-за роста зерен в металле.

Степень разрежения в рабочей камере влияет на один весьма важный процесс, протекающий в металле при таких условиях, — на так называемое обезгаживание. Процесс очень полезен технологически: в вакуум уходят растворенные в металле газы; при высоких тем-

пературах диффузия от внутренних слоев к наружным и приводит к улучшению структуры, «залечиванию» микропор и микрощелей. Последнее весьма способствует высокой пластичности и прочности соединений.

Упомянем также о том, что на прочность сварного соединения влияет степень охлаждения сваренных деталей непосредственно в рабочей вакуум-камере. Профессор Н. Ф. Казаков приводит такие данные: если принять за 100% прочность соединения при 1000°C, то охлаждение в камере до 600° повысит прочность соединения более чем на 10%, до 400° — на 30% с лишним, до 200°C — почти на 45%.

Интенсифицировать диффузионный процесс можно также наложением электрических и ультразвуковых колебаний. Метод используется, в частности, тогда, когда необходимо соединить тугоплавкие материалы или, напротив, материалы, имеющие низкотемпературные точки фазовых превращений и реакций.

Правильное использование перечисленных приемов, установление оптимального соотношения между параметрами позволяют решать задачи соединения самых различных материалов.

Для осуществления диффузионной сварки в вакууме в настоящее время применяются различные установки (СДВУ — сварочные диффузионные вакуумные установки). По степени автоматизации процесса СДВУ делятся на имеющие ручное управление, полуавтоматические и автоматические. Для серийно и поточно-массового производства они могут быть машинами роторного типа и автоматами шлюзования. По конструкции СДВУ бывают однокамерными и многокамерными (по количеству вакуумных камер); однопостовыми и многопостовыми (по количеству деталей, одновременно свариваемых в рабочей камере); однопозиционными и многопозиционными (по количеству рабочих мест, где проводятся отдельные операции сварочного цикла); машинами с общим или с местным вакуумом (в зависимости от полноты вакуумирования свариваемых деталей).

Кроме того, СДВУ делятся на группы по способу интенсификации процесса (нагрев, наложение электрических колебаний, наложение ультразвуковых колебаний). Используются различные методы нагрева: радиационный, нагрев за счет теплопроводности, комбинированные. Давление на свариваемые детали в зависимости

от их формы и материала осуществляется контактным давлением от пуансона, пневматическим и т. д. Одним словом, диффузионная сварка в вакууме оснащена сейчас таким количеством установок, которое позволяет решать самые разнообразные технологические задачи.

Академик Б. Е. Патон указывал: «...генеральное направление развития сварки — отказ от расплавления металла». Все три метода, описанные в данной главе (сварка трением, сварка взрывом, диффузионная сварка в вакууме), развиваются именно так. Однако новейшая техника, создаваемая в процессе научно-технической революции, не отказывается и от классического приема — расплавления металла свариваемых элементов. Только методы воздействия на материал совершенно иные. С ними читатель познакомится в следующей главе.

Сварка плазмой, пучком электронов и лучом лазера

Сваривает плазменная струя. Плазма уже довольно давно нашла применение в технологических процессах. Впереди шла плазменная резка, которая в отличие от газовой и воздушно-дуговой позволила быстро и точно разрезать алюминиевые и медные сплавы и высоколегированные стали.

Принцип работы плазменной горелки таков. Вдоль дуги по каналу подается газ — азот, аргон, водород или метан. Газ нагревается до очень высоких температур, его молекулы ионизируются, и из сопла вылетает ярко светящаяся струя. Магнитное поле, возникающее вокруг плазмы, еще больше ее сжимает; в результате температура повышается до 300 тыс.° С. Скорость потока плазмы достигает 1000 м/с. Плазменная струя режет любой материал: высоколегированную сталь и металлокерамику, цветные металлы и сплавы, тугоплавкие молибден и цирконий. Она легко справляется с алюминиевыми и медными изделиями толщиной до 20 см. Высокая производительность процесса вполне оправдывает расходы на дорогостоящий аргон; во многих случаях можно использовать дешевую смесь азота с водородом.

Когда примерно десятилетие назад в Институте металлургии им. А. А. Байкова были созданы первые несколько разновидностей газоплазменных горелок, о применении плазмы для сварки говорили довольно осторожно, хотя в отдельных случаях метод уже начали реализовывать. Сейчас плазменная сварка завоевала достаточно прочные позиции; созданы специальные сварочные автоматы.

...в городе Новоуткинске Свердловской области есть завод «Искра», где выпускаются электросварочные машины и автоматы. С 1974 г. среди прочих изделий завод «Искра» выпускает автоматы марки АП-301 для плазменной сварки соединений аккумуляторных пластин. Эти автоматы успешно применяются на ряде заводов, производящих аккумуляторы. Промышленная практика подтвердила выводы, сделанные на основании теории и лабораторных экспериментов: высокотемпературная плазма значительно улучшает качество сварных соединений.

В последнее время плазменная сварка нашла применение в медицине. «Отточенный» как острие самой тонкой иглы, плазменный поток стал незаменимым инструментом в стоматологическом кабинете одной из киевских поликлиник. Метод сварки плазмой зубных протезов позволил избежать использования связующих материалов (серебра, меди, никеля и др.), которые были необходимы при прежнем способе — пайке. Эти металлы менее стойки, чем основной материал — золото и нержавеющая сталь, к химическому воздействию пищевых продуктов и долгой нагрузке не выдерживали. Применение сварки вместо пайки — как и во многих других областях — улучшило качество соединения, сделало изделие более надежным и долговечным.

Электронно-лучевая сварка. При этом методе металл свариваемых кромок деталей расплавляет энергия быстродвижущихся электронов, которыми бомбардируют места соединения. Сварка с помощью пучка электронов ведется в вакуум-камерах или камерах, наполненных инертным газом. Изделия, находящиеся в вакуумной камере, сваривают тонким и очень прочным, не требующим дополнительной обработки швом.

Сердце установки — электронная пушка. При ее создании ученым и инженерам пришлось преодолеть немало трудностей. Нелегко было добиться, например,

хорошей фокусировки пучка и защитить вольфрамовую нить от брызг металла. В пушке можно менять форму электронного пятна, сжимать его в точку или растягивать в линию.

Для сварки тонких деталей электронный пучок надо «разогнать» напряжением 15—20 кВ; при толщине 5—10 мм требуется уже 100 кВ. Получить такое напряжение нелегко (кроме того, электроны, разогнанные до 200 тыс. км/с, начинают излучать рентгеновские лучи: от них требуется особая защита). Выручила созданная в Институте электросварки им. Е. О. Патона короткофокусная электронно-оптическая система с электромагнитными линзами и диафрагмой между ними, окончательно фиксирующими луч. Диафрагма помогает выделить среднюю, наиболее эффективную часть луча, что позволяет обрабатывать металл большой толщины при низких ускоряющих напряжениях.

В электронных пушках катод подключается к накальному трансформатору и нагревается током до 2400° — 2500°C . К катоду и аноду от высоковольтного трансформатора подводится напряжение (от 20 до 150 кВ). Электроны «обжимаются» электростатическими и электромагнитными линзами; луч фокусируется на площади диаметром до 0,001 см. Кинетическая энергия электронов почти без потерь переходит в тепло, температура в пятне достигает 6000°C . Энергия в пятне обладает большой плотностью, поток электронов параллелен, глубина проникновения луча может быть в 100 раз больше его диаметра. Если хорошо сфокусировать луч и подводить энергию короткими импульсами, то околошовная зона не превысит и одной десятой толщины листа. Электронный луч дает очень тонкий, кинжальный шов.

Линейный шов на электронно-лучевой сварочной установке можно получить, либо перемещая под лучом свариваемые детали, либо передвигая пятно луча с помощью электромагнитной отклоняющей системы.

Первые установки электронно-лучевой сварки предназначались для соединения мелких элементов. Сейчас успешно эксплуатируются электронно-лучевые аппараты для сварки крупногабаритных деталей. У них большие, толстостенные вакуумные камеры, мощные приводы для вращения и перемещения изделий, по несколько электронно-лучевых пушек.

Электронный луч способен сваривать любые материалы. Шов очень однородный, так как в вакуумной камере нет воздуха, газы которого могли бы вредно воздействовать на расплав. Больше того, в условиях вакуума происходит дегазация металлов, и после сварки материал изделия оказывается более чистым, чем до нее.

Любопытно, что электронно-лучевая сварка позволяет в принципе соединять одновременно несколько пар деталей, расположенных одна над другой. Дело в том, что часть луча, выходящего из деталей, остается сфокусированной.

Электронно-лучевая пушка стала привычным оружием на предприятиях, производящих полупроводниковые и оптические приборы. Здесь луч используется и для резки, и для сварки, и для напыления пленок, и для ряда других операций.

Отметим, что пушки, которые применяют для микрообработки, должны обеспечивать стабильный пучок электронов. А для этого необходимы стабильные высоковольтные источники питания. Так, требуемая при микрооперациях точность обработки может быть достигнута, если отклонение ускоряющего напряжения не превышает $\pm 0,1\%$. Такие же требования и к величине пульсации — не более $\pm 0,1\%$. Поиски наиболее удачных конструкций электронно-лучевых пушек промышленного назначения продолжаются.

Сварка лучом лазера. По мнению ученых и инженеров, большое будущее ожидает использование в сварочном деле еще одной формы лучистой энергии, а именно светового луча огромной энергетической плотности, испускаемого квантовым генератором — лазером. Именно лазером советские космонавты осуществили первую космическую сварку. Прогнозы специалистов в данной области весьма оптимистичны. Это и понятно.

Сейчас уже хорошо известно, что луч лазера — еще более мощный, тонкий и гибкий «инструмент», чем электронный луч. Микронное его острие в десятки доли микросекунды способно «прошить» даже алмаз. При этом зона термического воздействия и вызываемые воздействием деформации в материале минимальны.

Далее, лазерный луч намного маневреннее, чем электронный. Его можно как угодно преломлять с помощью зеркал и призм, что позволяет «добраться» до

любого места изделия. Наконец, обработку материалов с помощью лазера можно вести практически в любой среде, лишь бы она была прозрачна. Больше того, обрабатываемое изделие можно поместить в герметичную емкость из стекла и выкачать оттуда воздух; луч лазера свободно пройдет через стенки такого сосуда и просверлит, сварит, разрежет изделие.

Уникальные свойства лазерного луча позволили применить его для обработки и сварки миниатюрных деталей из сверхтвердых материалов. Значение этого трудно переоценить. Одно из направлений технического прогресса — стремление к высокой плотности электронных схем, к высокому коэффициенту заполнения. А отсюда — к миниатюризации и элементов. Вот почему тончайшая обработка материалов вообще и сварка в частности с помощью луча квантового генератора справедливо заняли одно из важных мест в арсенале научно-технической революции.

Да, пожалуй, наиболее перспективная область применения лазерной сварки — микроэлектроника и вообще радиоэлектроника. Здесь применение сварки лазерным лучом позволяет надежно соединять (встык, внахлест, Т-образно и крестообразно) круглые и плоские проводники из меди, никеля, золота, кобальта, нержавеющей стали, тантала и т. д. толщиной от 0,05 до 0,5 мм. Лазерная сварка хорошо зарекомендовала себя как надежный метод соединения плоских выводов корпусов интегральных схем с токоведущими дорожками печатных плат; в данном случае повышенная надежность монтажа достигается, в частности, благодаря приварке каждого вывода в нескольких точках. Хорошие результаты дает и комбинированный метод, при котором сварное соединение образуется за счет нагрева лазерным лучом и давления, создаваемого инструментом-пуансоном. Роль последнего играет капилляр из диэлектрика (кварц, сапфир), через который проходит луч лазера.

Познакомившись со сваркой, при которой нагрев свариваемых поверхностей осуществляется воздействием лучистой энергии, перейдем к другим сравнительно новым способам соединения материалов. Речь пойдет о сварке, при которой кромки соединяемых деталей нагреваются при воздействии на них ультразвука и ТВЧ (токов высокой частоты). Эти виды сварки — тема следующей главы.

Сварка ультразвуком и токами высокой частоты

Сварка ультразвуком. Применение ультразвука для нагрева кромок свариваемых элементов дает хорошие результаты особенно при соединении цветных и редких металлов и сплавов. Вибрацию как источник нагрева впервые применили немецкие ученые; затем американские специалисты использовали для этой цели колебания ультразвуковой частоты. Сейчас метод ультразвуковой сварки широко встречается в промышленной практике многих стран. В СССР плодотворные исследования по дальнейшему развитию метода ведутся, в частности, в МВТУ им. Баумана.

Ультразвуковой контактной сваркой вначале соединялись только очень тонкие элементы — фольга из алюминия, меди и сплавов этих металлов. Позднее научились соединять и другие материалы — латунь и нержавеющей сталь, титан, тантал и др. Кроме того, ультразвук нашел применение и для сварки более габаритных изделий. (Отметим также, что ультразвуковой сваркой соединяют элементы из пластических масс — об этом будет подробно рассказано несколько позже.)

Очень важна в ультразвуковой сварке проблема подвода колебаний к соединению. Существуют две наиболее распространенные схемы — с боковым выступом, разработанная советскими учеными, и с поперечным волноводом, созданная сварщиками Англии и США. Обе они имеют определенные преимущества. Так, если для первой характерны надежность, компактность конструкции, возможность использования ее для сварки изделий большой толщины и т. д., то вторую отличают большая экономичность, более высокий к. п. д. и ряд других достоинств.

Волноводы, или ультразвуковые концентраторы, которые служат для передачи механических колебаний от вибратора (магнитостриктора), могут изготавливаться из различных материалов: высокоуглеродистой или малоуглеродистой стали, меди, никеля, дюралюминия, вольфрама и др. При выборе материала для волновода учитывается, что чем меньше масса и чем выше упругие свойства, тем меньше энергии теряется в нем. Различными могут быть и формы волноводов (ступенчатые,

цилиндрические, конические, экспоненциальные, катеноидальные и т. д.). У каждой формы есть свои преимущества и связанная с этим сфера применения. Специфические требования предъявляются и к креплению волновода к вибратору, из которых самое важное — обеспечение надежного акустического контакта.

Ультразвуковая контактная сварка — механизированный и автоматизированный процесс, осуществляемый с помощью различных машин и механизмов: в Советском Союзе разработана достаточно обширная серия сварочных агрегатов, пистолетов и других приспособлений.

Сварка ультразвуком привлекает большое внимание специалистов электромеханической и радиоэлектронной промышленности. Это связано с рядом особых требований, которые предъявляют в названных отраслях к соединению материалов. В частности, здесь часто бывает жестко ограничена максимальная температура нагрева, превышение которой может привести к недопустимому изменению параметров изделия. Кроме того, соединение материалов в электротехнике и радиоэлектронике должно обеспечить надежный электрический контакт, герметичность системы, высокую антиударную стойкость и т. д.; материалы же могут обладать самыми различными свойствами — от высокой тугоплавкости вольфрама или молибдена до легкоплавкости меди или алюминия.

Ультразвуком можно сваривать и металл с керамикой, что необходимо в электротехнике. А в радиоэлектронике нынешнего дня все большее значение приобретают пленочные микросхемы, при изготовлении которых также используют ультразвуковую сварку.

Незаменим метод и при сварке алюминиевых проводников с напыленными золотыми пленками. Правильный подбор параметров режима (частота и амплитуда колебаний сварочного инструмента, контактного усилия, т. е. усилия сжатия деталей, длительность импульса ультразвука) позволяет получить при этом чрезвычайно прочные соединения. Опыт советских специалистов показал, что соединения сваренной ультразвуком алюминиевой проволоки, покрытой золотой пленкой, на срез равнопрочны с основным материалом проводника, а на отрыв проявляют до 90% его прочности. А главное — сварка не отражается на напыленном покрытии проволоки, что

обязательное условие создания высококачественной схемы.

Сварка с нагревом ТВЧ. Нагрев кромок свариваемых изделий токами высокой частоты — принцип индукционной сварки. Суть метода в следующем. С помощью индуктора создается переменное магнитное поле высокой частоты. Если внести в него металлические детали, в них появляются индуцированные ТВЧ, которые быстро нагревают тонкий наружный слой металла. Теперь остается сжать свариваемые поверхности — и соединение получено.

Первой сферой использования индукционной сварки ТВЧ было трубное производство (главным образом трубы из сплавов алюминия, никеля, меди, нержавеющей стали). Здесь впереди были сварщики США. Затем западногерманские специалисты применили индукционную сварку для производства коленчатых валов. В Советском Союзе индукционной сваркой ТВЧ занимаются в Институте электросварки им. Е. О. Патона, в НИИ токов высокой частоты им. Вологодина и др.

Один из первых успехов советских сварщиков — создание установки для индукционной сварки прямошовных труб диаметром до 75 мм. Затем в НИИ им. Вологодина создали оригинальный способ продольного шва труб большого диаметра. С помощью ТВЧ кромки нагреваются на всем их протяжении. Ток подводится к обеим свариваемым кромкам одновременно с одной стороны (либо с наружной, либо с внутренней). С противоположной стороны к заготовке присоединены шины, по которым он уходит обратно к источнику энергоснабжения. Поскольку электрический ток в заготовке и электрический ток в шине противоположны по направлению, они по закону так называемого эффекта близости концентрируются в небольшой по ширине полосе металла заготовки (в той, которая обращена к шине). Такая концентрация способствует быстрому нагреву кромок.

Во второй части настоящей брошюры будет рассказано о специфических методах соединения полимерных материалов и о пайке, о промышленном склеивании. Однако прежде чем перейти к этому рассказу и тем самым расстаться с темой сварки, автор считает необходимым сделать некоторое предварительное подведение итогов в следующей главе.

Основные направления дальнейшего развития науки о сварке

По мнению специалистов, основные проблемы, над которыми в ближайшее время будут работать ученые-сварщики и практики сварочного производства, таковы: разработка и внедрение новых и усовершенствование существующих технологических процессов сварки различных материалов с целью повышения производительности и качества сварочных работ;

создание нового, еще более высокоэффективного оборудования;

развитие научных основ применения прогрессивных конструкционных материалов для изготовления сварных конструкций с целью повышения их надежности, долговечности и экономичности.

Основными направлениями в решении этих проблем станут дальнейшее развитие научных основ сварочных процессов, металлургии, металловедения и технологии сварки металлов и сплавов; усовершенствование существующих и создание принципиально новых способов и технологии сварки; разработка технологии сварки новых композиций разнородных металлов и сплавов, внедрение их в производство; разработка и создание новых и усовершенствование существующих типов сварочного оборудования и аппаратуры управления для различных способов сварки; разработка основ проектирования, изыскания конструктивных форм изготовления сварных конструкций с применением прогрессивных конструкционных материалов — с целью повышения их эксплуатационной надежности, экономичности и долговечности; разработка основ создания сварочных материалов и изыскания принципиально новых и усовершенствование существующих типов сварочных материалов (электродов, проволок, флюсов, газовых смесей и др.), а также создание высокопроизводительных технологических процессов и оборудования для изготовления этих материалов; разработка высокоэффективных, высокопроизводительных методов и средств контроля качества сварных соединений.

Особое внимание будет уделено специализации, комплексной механизации и автоматизации производства

сварных конструкций, сварных материалов и оборудования.

Нам специально хотелось бы подчеркнуть, что темы научных разработок определяются не по прихоти тех или иных ученых. Они — ответ на требование времени, на тот «заказ», которые перед учеными ставят развитие общества и научно-техническая революция. И нет никакого сомнения, что советские ученые-сварщики и многотысячный отряд практиков сварочного производства этот «заказ» выполняют.

Для подобного оптимизма есть весьма веские основания. В результате полувекового развития сварка, созданная как вспомогательная операция, превратилась, по словам академика Б. Е. Патона, в «мощную сумму технологий современной промышленности». В настоящее время сварка — ведущая операция при изготовлении примерно 50% всех металлических конструкций в тяжелой промышленности нашей страны.

В пятилетнем плане развития сварочного производства особое внимание уделено его дальнейшей комплексной механизации. Этот процесс, подготовленный успехами последних лет, развивается весьма эффективно. Следует напомнить, что если в 1958 г. была механизирована десятая часть сварочных процессов, то в 1972 г. они были механизированы уже более чем наполовину. Однако перед наукой о сварке сейчас уже стоят более масштабные задачи.

Известно, что на долю самого процесса сварки в общем объеме производства сварных конструкций приходится примерно пятая часть всех трудовых затрат. Вот почему механизация и автоматизация лишь сварки не могут дать требуемого ответа на запросы научно-технической революции. Механизированным должен стать весь процесс создания сварных конструкций, в том числе операции по транспортировке, сборке под сварку, контролю качества и надежности, завершающей отделке и т. д. и т. п. По мнению академика Б. Е. Патона, решение этой задачи — дело ученых-сварщиков, ибо сварка здесь ведущий технологический процесс.

В отдельных отраслях производства ученым удалось добиться искомого эффекта. Примером может служить, в частности, новый, непрерывный процесс изготовления сварных отопительных радиаторов. Радиаторы нового типа (первые автоматизированные линии по их произ-

водству были пущены в Ленинграде и Новокузнецке) собираются из тонкой листовой стали сваркой двух плоских заготовок, в которых предварительно отштампованы каналы для циркуляции воды.

Создание автоматической линии стало возможным благодаря реализации двух оригинальных технических идей. Первая из них — предложение заменить периодические процессы формовки заготовок непрерывной штамповкой в роликах. Вторая — применение так называемых «летучих» сварочных машин, которые позволяют выполнять сварку на движущемся конвейере. В результате полезное время на многих операциях составляет 100%. А общий итог таков: производство радиаторов нового типа экономит в год около 80 млн. руб., 500 тыс. т черного металла.

Последние разработки ученых-сварщиков уже представляют возможность заглянуть и в более отдаленное будущее техники. Одна из советских разработок, проведенная совместно Институтом электросварки им. Е. О. Патона и Горьковским автозаводом, позволила спроектировать работа-сварщика.

Уже известно около двух десятков профессий роботов первого поколения — погрузка, механическая обработка, литье, штамповка и др. (Напомним, что от обычного автомата робот отличается способностью к «обучению», наличием «памяти».) Опытный образец работа-сварщика работает на Горьковском автозаводе, где ему «поручена» точечная сварка кабин автомобилей ГАЗ-24 и ГАЗ-53А. В ближайшее время два десятка таких роботов выстроятся здесь в автоматическую линию. Человек с тяжелыми сварочными клещами уйдет из цеха контактной сварки.

Исполнительные, надежные помощники человека, роботы первого поколения не умеют реагировать на изменение окружающей среды. Вот почему на них нельзя возложить выполнение технологических операций, требующих постоянного контроля за процессом, например дуговую сварку. И ученые уже думают о роботе-сварщике второго поколения. Академик Б. Е. Патон так характеризует будущего работа-сварщика: «В его памяти будет модель окружающей среды. Оптические датчики обеспечат ему систему обзора, тактильные — осязание. Добывать информацию будут пневмоакустические дат-

чики и датчики инфракрасного излучения. Сравнение изначального представления о среде с новой информацией определит поведение робота».

Соединение деталей из пластмасс и полимерных пленок

Все более широкое использование пластических масс в качестве конструктивных материалов потребовало разработки широкой номенклатуры методов их соединения. Нашла здесь применение и сварка — в специфических формах, конечно. Сварку пластических масс можно сгруппировать в два основных вида — диффузионную и химическую. Каждый из них имеет ряд разновидностей.

Диффузионная сварка. Применяется для соединения как отвержденных материалов, так и термопластов. Номенклатура ее включает в себя такие методы, как сварка с применением теплоносителя, сварка в поле ТВЧ, сварка с помощью излучений, сварка трением, сварка ультразвуком, сварка с помощью растворителей. В свою очередь, сварка с применением теплоносителей — это сварка нагретым инструментом, нагретым присадочным материалом и струей нагретого газа.

Детально разработано несколько способов сварки нагретым инструментом: контактно-тепловая прессованием, термо-импульсная с использованием металлических лент с повышенным сопротивлением, нагреваемых импульсами электрического тока, и т. д. В последние годы предложена сварка нагревателем, остающимся в сварном шве. Не разбирая подробно перечисленные способы, скажем только, что при использовании любого из них свариваемые детали нагреваются при соприкосновении со специальным нагретым инструментом; спрессовываются свариваемые поверхности, как правило, давлением того же инструмента. Для соединения пластмассовых изделий нагретым инструментом в настоящее время широко используют полуавтоматы и автоматы.

При сварке нагретым газом истекающая из наконечника нагревателя струя размягчает свариваемые кромки (и основание прутка, если при этом используется присадочный материал). К прутку прикладывают давление,

он сваривается с размягченными кромками; образуется сварной шов. Его качество зависит и от основного и присадочного материала, и от типа шва, и от его формы. Выбор формы определяют конструкция свариваемой детали, ее назначение и будущие нагрузки. При сварке пластмасс используют различные типы швов: стыковые, торцовые, тавровые, внахлестку и т. д. В роли газа-теплоносителя применяют сейчас воздух, азот, аргон, двуокись углерода (при сварке полимеров, подверженных термоокислительной деструкции), кислород (при сварке поливинилхлорида). Температуру газа на выходе из сопла выбирают в зависимости от характеристик свариваемого материала.

Когда хотят ускорить сварочный процесс, применяют нагреватели, оснащенные системой предварительного нагрева присадочного и основного материала. Способ целесообразен для сварки термопластов, расплав которых имеет склонность к термоокислительной деструкции (полиамиды, полиолефины), или обладающих низкой температурой термической деструкции (поливинилхлорид).

Более высокой скорости процесса позволяет добиться сварка нагретым газом без присадочного материала. Метод дает и более прочные соединения. Сварку нагретым газом без присадочного материала используют главным образом для получения сварных изделий из элементов одинаковой толщины во всех сечениях, например пленок. Особенность процесса в том, что струя газа не только нагревает свариваемые элементы до необходимой температуры, но и создает давление, нужное для контакта между свариваемыми поверхностями. Чтобы струя не порвала пленку, под нее подкладывают упругую подложку.

Сварка нагретым газом может быть ручной и автоматической или полуавтоматической. В отечественной промышленности сейчас применяется несколько видов автоматов и полуавтоматов для сварки пластмасс нагретым газом.

Среди методов сварки с помощью излучений прежде всего следует упомянуть сварку нагретым инфракрасным излучением. Так соединяют фторопласты и полиамиды, пенопласт и полиэтилентерефталат, поливинилхлорид и другие материалы.

В связи с тем что различные полимеры поглощают различные части инфракрасного отрезка спектра, длину волны излучения выбирают в зависимости от свойств соединяемых материалов. В то же время известно, что чем толще материал, тем выше его поглощающая способность. Можно увеличить ее, вводя в полимеры красители или наполнители.

Отсутствие прямого контакта между нагреваемым материалом и излучателем не препятствует передаче тепла, поскольку газовая среда хорошо проницаема для инфракрасных (ИК) лучей. Этим же объясняется высокий к. п. д. ИК-нагревателя: потери энергии, связанные с непроизводительным нагревом воздуха, минимальны. Замечено, что чем меньше разница температур облучаемой поверхности и воздуха, тем равномернее нагрев.

Характеристика процесса при соединении пластмасс методом инфракрасного нагрева во многом зависит от выбора подложки, на которой располагаются свариваемые элементы. Подложки, как правило, черные — микропористая резина, бумага, прорезиненная ткань, пенополиуретан и т. д. Это объясняется тем, что чем выше она поглощающая способность, тем быстрее и сильнее они нагреваются, тем больше тепла отдают свариваемому материалу.

Для сварки пластмасс с помощью инфракрасного излучения отечественная промышленность выпускает машины со сменными сварочными головками. Головка к сварочной машине МСП-5У, например, устроена так. В бобышках корпуса, отлитого из алюминиевого сплава, установлены ведущий и опорный свободно вращающиеся ролики. На оси последнего подвешена специальная чашка с еще одним роликом, подторможенным; с его помощью создается необходимое для сварки натяжение материала, к которому ролик прижимается пружиной. К корпусу головки прикрепляется нагреватель. Его охлаждаемый водой кожух делается из двух перемещающихся друг относительно друга частей. Это необходимо для регулировки ширины шва. В кожух заключен инфракрасный излучатель — нихромовая спираль, намотанная на фарфоровую трубку.

Еще один вид сварки пластмасс с нагревом излучениями — так называемая ядерная сварка (нейтронным излучением). Первые опыты в этой области были про-

ведены советскими учеными в 1960 г. Ядерная сварка применяется не слишком широко из-за возникающей в материале под действием нейтронного излучения наведенной радиоактивности. Но некоторым элементам радиоактивизация не страшна. Поэтому есть все основания полагать, что сварку действием нейтронного излучения ждет большое будущее. Это тем более вероятно, что в применении к пластмассам данный метод очень заманчив: им можно соединять элементы из термопластов не только между собой, но и с такими материалами, как алюминий, керамика, кварц. Сварка полимерных материалов в поле токов высокой частоты основана на преобразовании электроэнергии в теплоту непосредственно в самом материале. В результате материал нагревается до температур, необходимых для сварочного процесса.

Сварка в поле ТВЧ — метод экономичный. Он позволяет снизить затраты на электроэнергию и на различные накладные расходы, добиться значительной экономии за счет снижения процента брака. Особенно успешно применяется для сварки элементов из жесткого и пластифицированного поливинилхлорида, соединения которого при использовании контактно-теплого способа сильно снижают прочность всего изделия.

Осуществляется процесс так. Свариваемый полимерный материал размещают между двумя электродами. Это обкладки конденсатора, который включен в колебательный контур генератора электрических колебаний. Микродиполи полимера, помещенного в переменное электрическое поле, ориентируются в направлении электрического поля. Но знак зарядов на обкладках конденсатора меняется с большой частотой; меняется и ориентация диполей. Однако соседние звенья самой молекулы и соседние молекулы препятствуют переориентации. На преодоление сопротивления расходуется энергия; она превращается в теплоту, и полимер нагревается.

Зная параметры свариваемого материала (в частности, его относительную диэлектрическую проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь), можно подбором напряжения на рабочем конденсаторе и частоты электрического поля найти оптимальный вариант процесса. Так, интенсивность нагрева можно повысить, увеличив напряженность электрического поля. Однако увеличивать можно лишь до определенного предела (максимально допустимое напряжение должно быть в 1,5—

2 раза меньше пробивного напряжения материала). А увеличение частоты поля ТВЧ позволяет уменьшить напряжение, сохраняя при этом тот же уровень интенсивности нагрева.

Сварка пластмасс в поле ТВЧ осуществляется по двум основным схемам — прессовой и роликовой. При первом способе электроды, повторяющие внешнюю форму шва, не только подводят энергию к месту сварки, но и выполняют роль инструмента, оказывающего необходимое давление на материал. В последние годы создана конструкция электродов, которая позволяет сваривать высокочастотным прессовым методом изделия весьма сложной пространственной формы.

Очень важно, что и отвержденные пластмассы и термопласты можно сваривать этим методом по одной и той же схеме. В целом прессовая сварка пластмасс в поле ТВЧ служит для получения непрерывных протяженных швов так же, как и роликовая (два электрода, имеющих форму роликов, вращаются в противоположном направлении, один соединен с высокопотенциальным выводом генератора, а другой заземлен). Преимущество второго вида сварки — непрерывность процесса. Но есть у него и существенные недостатки. Главный из них — шов выходит из-под ролика в нагретом состоянии и при охлаждении уже без давления может деформироваться. Чтобы избежать этого, ограничивают скорость процесса, особенно при сварке изделий большой толщины.

Для сварки пластмасс в поле ТВЧ отечественная промышленность выпускает различные полуавтоматы и автоматы, в том числе и наиболее производительные — многопозиционные.

Трение, впервые примененное для соединения металлических деталей, используют и для соединения полимерных материалов. Как известно, этот вид сварки основан на превращении в тепло механической энергии трения между контактирующими поверхностями. Поскольку пластмассы обладают небольшой теплопроводностью, тепло сохраняется только в зоне сварки; температура всего изделия практически не меняется, и нагрев не оказывает на него вредного влияния.

Сварка пластмасс трением выгодна и еще одной своей особенностью. В процессе соединения свариваемые поверхности очищаются трением от окисной пленки и прочих инородных тел, в том числе и воздушных пузырей-

ков. В результате соединенные поверхности термопластов в разогретом состоянии предохраняются от термоокислительной деструкции.

Существуют три основных вида сварки полимерных материалов трением: вращением (вращаться могут либо свариваемые детали, либо промежуточный элемент), вибротрением (за счет вибрации свариваемых деталей или промежуточных элементов), вращательно-вибрационным движением (это сложное движение также могут совершать и свариваемые детали, и промежуточный элемент). В первом случае нагрев получается при трении вращающейся поверхности о неподвижную; промежуточный элемент применяется, когда из-за больших габаритов детали ее вращение и быстрое торможение затруднены. Вращением сейчас сваривают многие термопласты: полиэтилен, поливинилхлорид, полиметилметакрилат, полиформальдегид, полиамид, поликарбонат, полипропилен. Скорость выбирается в зависимости от типа термопласта и от формы изделия. Надо сказать, что на качество сварочного процесса вредно влияет и чрезмерно высокая и слишком низкая скорость. В первом случае возникает весьма интенсивная деструкция материала, а во втором вместо сварки происходит шлифование.

Сварка трением может осуществляться с помощью различных металлообрабатывающих станков. Выпускаются и сварочные машины на базе токарных станков, пригодные для сварки трением как пластмасс, так и металлов.

При сварке вибротрением свариваемым соприкасающимся поверхностям задаются низкочастотные колебания. Они нагреваются и после прекращения вибрации оказываются соединенными. От размеров свариваемых поверхностей и толщины деталей продолжительность процесса практически не зависит. Но сварку вибротрением можно применять только в тех случаях, когда масса вибрирующей детали не слишком велика. Что касается материалов, то вибротрением хорошо свариваются полиэтилен, полиамид, пластифицированный поливинилхлорид, жесткий винилпласт, органическое стекло и ряд других. В зависимости от особенностей того или иного материала выбираются различные режимы.

Сварка ультразвуком напоминает сварку вибротрением, только поверхностям задают не низкочастотные,

а высокочастотные колебания. Сейчас на ультразвуковых сварочных машинах получают точечные, прямолинейные и кольцевые швы.

Для сварки полимеров значительной толщины применяют шаговую подачу материала. Тонкие пленки можно сваривать непрерывным перемещением. Однако следует помнить, что инструментом, которым оказывается необходимое давление, можно повредить пленки. Если материал требует незначительного давления, применяют роликовую сварку (вращающийся ролик располагается под соединенными пленками).

Ультразвуковая сварка позволяет соединять как отвержденные пластики, так и термопласты, которые при нагреве способны переходить в вязкотекучее состояние. Важное преимущество ультразвуковой сварки в том, что нет необходимости в предварительной зачистке свариваемых поверхностей: масла, жиры, эмульсии, пыль удаляются из зоны сварки колебаниями материала. Наконец, ультразвуком можно сваривать и металлизированные пластмассовые изделия без всякой предварительной подготовки.

Сварку пластмасс с помощью растворителей можно назвать «сваркой» весьма условно. Она стоит особняком среди других видов диффузионной сварки — диффузия микромолекул полимера облегчается не нагревом, а действием растворителей. Сварка растворителем — процесс более длительный, чем нагревом. Это и понятно: скорость диффузии в набухшем поверхностном слое намного меньше, чем в нагретом до текучего состояния полимере. Дело в том, что то небольшое количество растворителя, которое наносится на подлежащие соединению поверхности, не может вызвать сильного набухания. Давление также прикладывается небольшое, чтобы не выдавить набухший слой.

Ускорение сварочного процесса и повышение прочности соединения достигается тем, что сварку осуществляют с применением присадочного материала, растворенного в органическом растворителе. Присадка — обычно тот же полимер, из которого сделаны соединяемые детали. Такой раствор быстрее диффундирует в пограничные слои обоих элементов изделия, чем набухший основной материал.

Сварка растворителем завоевала прочные позиции в тех технологических процессах, где необходимо соедине-

ние таких материалов, как полистирол, полиамид, поливинилхлорид, поликарбонаты, полиметилметакрилат (органическое стекло), различные сополимеры и т. д. Правда, метод не свободен от недостатков. В частности, попадающий внутрь полимера растворитель служит пластификатором, повышая эластичность и понижая прочность материала в околосшовной зоне. Кроме того, растворитель увеличивает объем полимера в зоне шва, соответственно увеличивая тем самым внутренние напряжения в прилегающих к шву слоях. Но этих дефектов можно избежать, применяя в качестве растворителя мономер, родственный свариваемому полимеру. Тогда по окончании диффузионного процесса мономер полимеризуется, сливаясь с основным материалом.

Наиболее распространенные виды сварных швов при соединении полимеров растворителем — швы внахлестку (тонкие пленки), встык (толстостенные изделия) и встык с односторонней накладкой (листовые термопласты средней толщины). Растворитель и раствор присадочного материала наносят распылением, кистью или просто погружая в него свариваемые кромки. Затем изделие некоторое время выдерживают в открытом виде, чтобы полимер хорошо набух, а избыток растворителя стек. Тогда уже можно переходить к запрессовке в рычажных, винтовых, пневматических или гидравлических прессах. Чтобы при запрессовке не произошло сдвига или перекоса, устанавливают упоры или шпильки. Выдержка под прессом продолжается до тех пор, пока не образуется твердый сварной шов.

Химическую сварку пластических масс можно так назвать еще более условно, чем последний из изложенных методов, — диффузионная сварка с применением растворителей. Это, собственно, весьма специфическая тема. Вот почему, ограничившись упоминанием того, что данный метод имеет практическое применение, мы отошли читателя к литературе, написанной специалистами-химиками.

Однако сколь ни условно название «сварка» для только что описанных методов соединения материалов, это все же сварка. А вот способ соединения, о котором речь пойдет ниже, в своей основе иной. Этот способ много старше сварки, и был период, когда он со сваркой не мог конкурировать. Однако в последнее время

он снова занял достойное место в номенклатуре методов соединения, которыми вооружена современная техника, современная промышленность.

Вторая жизнь пайки

Бурное развитие сварки в последние десятилетия сделало ее главным магистральным методом соединения материалов. Она постепенно почти полностью вытеснила из промышленной практики клепку и пайку, сократила сферу применения таких соединений, как резьбовые. Однако, как это порой бывает, технический прогресс неожиданно — на первый взгляд, разумеется, — вновь поставил на повестку дня вопрос о пайке, что связано прежде всего с развитием таких отраслей техники и производства, как приборостроение и радиоэлектроника.

Любопытно, что если в целом по промышленности пайкой сейчас осуществляется лишь несколько процентов соединений, то в электронных устройствах на пайку и сварку, работающие здесь «на равных», приходится более 70% соединений. Такого положения пайка смогла добиться, впитав в себя многие новые и новейшие достижения научно-технического прогресса. Теперь пайка уже не ассоциируется с паяльником в старом понимании этого слова. Современные «паяльники» работают на токах высокой частоты и на плазменной струе, на электронном и ионном пучках, на ультразвуке и на лазерном луче. Пайка осуществляется в вакууме и в среде инертного газа. Все это дает основание говорить о втором рождении пайки, занимающей сейчас достойное место в номенклатуре современных методов соединения материалов.

Прежде чем перейти к характеристике некоторых наиболее распространенных способов соединения деталей методом пайки в приборостроении и радиоэлектронике, постараемся представить себе картину в целом. Итак, каковы же методы пайки в современной промышленности?

Прежде всего следует назвать пайку деталей в нагревательных устройствах. Сами эти устройства могут быть электронагревательными, газопламенными, индукционными.

Далее, широко используется пайка индукционным нагревом токами промышленной частоты, повышенной частоты, высокой частоты.

Резистивная пайка осуществляется на контактных машинах и в электролитах.

Один из весьма прогрессивных методов — пайка погружением (в расплавы припоев или в расплавы солей).

При пайке горелками используются горелки разных типов — газовые, плазменные, электродуговые.

Метод радиационной пайки основан на различных способах нагрева — инфракрасным излучением, световым лучом, пучком электронов, пучком ионов, лазерным лучом.

Ультразвуковая пайка (так же, как описанная выше сварка ультразвуком) — один из широко применяемых сейчас методов соединения.

Пайка паяльниками осуществляется с непрерывным нагревом, косвенным периодическим нагревом и импульсным нагревом.

Разновидность выше названного метода — пайка микропаяльниками (непрерывного и импульсного нагрева).

Каждый из упомянутых методов пайки имеет свои преимущества и свою сферу применения. А вместе они создают широкую номенклатуру приемов, позволяющих успешно осуществлять пайку в самых различных случаях. При этом специалисты ведут постоянную работу по развитию и совершенствованию существующих методов.

Так, пайка паяльниками и микропаяльниками совершенствуется в направлении повышения надежности и других характеристик соединений. Создаются паяльные автоматы и полуавтоматы индивидуальной и групповой координатной пайки. Паяльники оснащаются все новыми и новыми видами наконечников — фасонными для пайки в труднодоступных местах; трубчатыми для пайки на штырьках; наконечниками с устройством для принудительной подачи или принудительного отсоса припоя; наконечниками, не загрязняющимися в процессе пайки, и т. д.

Пайка в электронагревательных печах и камерах и индукционная пайка используются для пайки индивидуальной и групповой. Однако у этих методов есть существенное различие. Пайка в электронагревательных устройствах связана с общим нагревом соединяемых

изделий. Ею соединяют изделия из стали, меди и других металлов и сплавов; соответствующие поверхности соединяемых изделий обычно предварительно облуживаются. Метод успешно осуществляется с применением твердых флюсов.

Индукционная пайка может выполняться как при общем, так и при локальном нагреве. Это весьма важно, так как многие элементы радиоэлектронных устройств при сильном общем нагреве могут потерять нужные рабочие качества. Наилучшее качество соединения оба метода — и пайка в электронагревательных устройствах и индукционная — дают при осуществлении процесса в среде инертного газа или в вакууме.

Индукционная пайка чаще всего идет с нагревом ТВЧ. При этом деталь подвергается локальному нагреву. Метод высоко производительен, легко поддается механизации и пригоден для группового процесса. Индукционная пайка позволяет качественно соединять детали из любых металлов и сплавов.

Газоплазменная пайка обычно используется при сварке конструктивных узлов и герметизации больших корпусов. Осуществляется она в атмосферной среде с применением тугоплавких припоев. Для присоединения (группового) плоских выводов микросхем к печатным платам применяют пайку струей нагретого газа (как правило, водорода). Это позволяет не перегревать микросхемы и диэлектрические основания.

Один из широко применяемых в радиоэлектронике методов пайки основан на погружении соединяемых деталей в расплавленный припой. Изделие погружают в припой полностью или частично в зависимости от расположения мест соединения, размеров и форм деталей. Однако метод не свободен от недостатков — он связан с большим расходом припоя, часты и нежелательные перегревы соединяемых деталей.

Вот почему в радиоэлектронике обычно используют его разновидность — так называемую пайку «на гребне волны» припоя. Способ при высокой производительности позволяет избежать перегрева деталей и снизить расход припоя. Кроме того, поверхность припоя на гребне волны всегда чиста, свободна от окисных пленок, что весьма положительно сказывается на качестве соединения. Есть разновидность методов, при которой детали соединяются струей расплавленного припоя, ее направляют поч-

ти к месту соединения. Пока данный способ связан в основном с ручным процессом, но ведутся работы, которые в ближайшем будущем позволят добиться его механизации.

Еще один способ пайки погружением основан на погружении соединяемых деталей в соляные ванны. Метод высокопроизводителен, изделие защищено от атмосферного воздействия и быстро нагревается. Расплавленная соль способствует удалению тонких пленок окислов с таких металлов, как медь, латунь, алюминий, низкоуглеродистая сталь и т. д.

Пайка с резистивным нагревом в электролите основана на том, что тепловой эффект возникает благодаря высокому сопротивлению водородной оболочки, которая образуется вокруг изделия, служащего одновременно катодом. Защитное влияние электролита способствует высокому качеству соединения. Второй вид резистивной пайки — с нагревом на контактных машинах — чаще всего используется при таких технологических операциях, как сборка тонкостенных элементов или соединение их с массивными.

Процесс ультразвуковой пайки попутно способствует удалению окисных пленок. Поэтому пайкой ультразвуком обычно соединяют детали из алюминия и его сплавов. Метод позволяет осуществлять безфлюсовую пайку легкоплавкими припоями.

Пайку различными горелками чаще всего проводят вручную и используют при сборке конструктивных деталей и элементов (для получения сложных фасонных швов).

Главное преимущество радиационной пайки — в бесконтактном высокоскоростном нагреве с хорошей его локализацией. Кроме того, радиационная пайка включает в себя весьма различные способы нагрева — от инфракрасного излучения до луча лазера; это позволяет выбрать нужные параметры из широкого диапазона выделенных удельных мощностей.

Пайка инфракрасным излучением хороша тем, что при ней невозможно загрязнение и нет наростов припоя. Такие загрязнения и наросты при высокой плотности печатных схем могут привести к замыканиям, к отказам в процессе эксплуатации. Вот почему инфракрасная пайка и нашла, в частности, применение при монтаже печатных узлов.

Лазерный луч сейчас широко применяется для пайки гибких печатных кабелей и плоских микропроводников. И вообще следует сказать, что у лазерного луча в области пайки так же, впрочем, как и в области сварки, о чем говорилось раньше, большое будущее.

Рассказав о сварке и пайке, которые при всем своем внутреннем различии имеют все же нечто общее, перейдем к методам соединения, основанным на совершенноном принципе. Принцип достаточно «традиционен», однако в «серьезных» отраслях индустрии прежде практически не применялся. Чтобы понять, о чем пойдет речь, достаточно прочитать название следующей главы.

Склеивание

Недавно правительство США приняло специальное постановление, запрещающее розничную продажу одного сорта клея. Это было связано с тем, что клей... слишком хорошо склеивал: пальцы, склеенные им, можно было разделить лишь хирургическим путем. Использовать клей разрешили только в промышленном производстве при соблюдении определенных правил.

Сейчас склеивание как метод промышленного соединения материалов применяется очень широко. Развитие химии полимеров в последние десятилетия позволило получить клеи, надежно соединяющие различные конструктивные материалы: металлы между собой, металлы со стеклом и керамикой, пластмассы и т. д.

Клееные соединения нередко предпочитают сварным, клепаным или паяным. Так, применение клеев в авиационной промышленности, в приборостроении обусловлено не только требованиями к прочности, надежности и технологичности изделий, но и высокой стойкостью клеев к целому ряду физико-химических воздействий. Они выдерживают охлаждение до -60°C и нагрев до $+200^{\circ}\text{C}$ (а кратковременно — и до 500°C); стойки к воздействию различных органических растворителей, масел, антифризов, паров и т. д. А в ряде машин и приборов клееные соединения металлов с неметаллическими материалами — единственно возможные по условиям технологии.

При сравнении сварных или клепаных соединений с клееными выявляется ряд преимуществ последних: прочность клеевого соединения несколько выше (благодаря отсутствию концентрации напряжений, в общем-то неизбежных, например, в сварном шве); как правило, уменьшенный вес конструкций; возможность соединения очень тонких листовых деталей; меньшая стоимость по сравнению с другими видами соединений. К основным недостаткам клееного соединения следует отнести его неодинаковую устойчивость к нагрузкам, приложенным в разных направлениях, а также «старение», т. е. уменьшение со временем прочности соединения.

При выборе клея необходимо учитывать ряд специфических условий. Прежде всего клеи не должны влиять на физико-химические свойства материалов: не снижать их прочность, не вызывать коррозию и т. д. Когда клеи и смолы служат связующими элементами или заполнителями, к ним также предъявляют специфические требования, например, одинакового с основным материалом коэффициента температурного расширения. Помимо того, в подобных случаях клей зачастую выполняет роль диэлектрика.

Прочность соединения материалов при склеивании во многом зависит от структуры и характера самих материалов, методов обработки поверхностей склеивания, условий, в которых происходит процесс (различные температурные режимы, наличие давления и т. д.). Эти факторы необходимо учитывать при рассмотрении процессов склеивания.

Несмотря на то что окончательных теоретических обоснований механизма связей между клеем и материалом нет, практические данные, накопленные за последние годы, показали, что на процесс склеивания можно влиять различными методами, добиваясь заранее предполагаемых результатов. Это в равной степени относится и к прочности соединения, и к его эластичности, и к тепло- и влагостойкости, и к устойчивости против вибрации и ударных нагрузок.

Чтобы расширить области применения, клееные соединения часто делают комбинированными. Наиболее распространено соединение материалов склеиванием с заполнителем типа пенопласта, с гофрированным или с сотовым заполнителем. Сотовый заполнитель делается из алюминиевой фольги, стеклоткани или сплавов алю-

миния. С ним можно склеивать обшивки из дюралюминия, стали, титана, стеклотекстолита и других материалов. Сотовые конструкции на основе клеев хорошо работают при низких (-60°C) и повышенных ($+60^{\circ}\text{C}$) температурах, выдерживают длительные воздействия воды и влажного воздуха.

В швейной промышленности склеивание также нашло применение. В настоящее время на смену ниточному шву все чаще приходит клееный. Причем это относится не столько к изделиям из различных заменителей, сколько к хлопчатобумажным, шерстяным, шелковым и другим тканям.

Технология склеивания пришла и в строительное дело. Промышленность строительных материалов освоила изготовление непрозрачных перегородок (используются при возведении административных зданий) склеиванием облицовочного стекла с промежуточным слоем из алюминиевых «сот». Большое распространение в отечественном строительстве получили звукоизолирующие перегородки, склеенные с промежуточным слоем из армированных пенопластов и пеноэпоксидов. (Следует отметить, что подобные конструкции применяются также в кораблестроении, самолетостроении, вагоностроении, при изготовлении рефрижераторов и т. д.).

В данном случае речь идет о клеющих составах на основе эпоксидных смол. Эти же клеи применяются — и как связующее, и как диэлектрик — в электротехнической и радиоэлектронной промышленности: для герметизации электронных элементов, для склеивания металлических и пластмассовых деталей в электроаппаратуре, для склеивания сердечников катушек и даже роторных и статорных пластин в электрических двигателях.

При изготовлении высоковольтных и низковольтных изоляторов вместо фарфора и керамики все чаще применяют эпоксидные компаунды. Они же с успехом используются для создания блоков из нескольких элементов и как средство герметизации отдельных элементов и блоков. В радиотехнической и электронной промышленности с разработкой сложных блоков, в которых есть сопротивления, полупроводники, конденсаторы и прочие элементы, уменьшились размеры схем. Дело в том, что литая изоляция дает лучшие по сравнению с открытым монтажом показатели диэлектрических свойств.

Технология изготовления подобных блоков может быть различной. Один из наиболее современных методов предусматривает монтаж элементов на сепараторе, который затем размещается в форме и заливается эпоксидным компаундом. После отверждения последнего извлеченный из формы блок имеет вполне законченный вид и, как правило, не нуждается в дополнительной отделке.

Следует упомянуть также, что эпоксидные клеи нашли применение для заделки дефектов литья различных раковин и трещин. Они используются при ремонте поршней в двигателях разного рода транспортных средств — автомобилей и тракторов, судов и т. д.

Потребность промышленности — прежде всего авиационной — заставила специалистов разработать ряд клеев, особенно стойких к нагреву. Среди таких составов можно назвать, например, английские клеи Ридакс (верхняя граница рабочей температуры $+100^{\circ}\text{C}$), Метлонд ($+170^{\circ}\text{C}$), который к тому же стоек к сильным изгибающим и ударным воздействиям, американские клеи СНТ ($+315^{\circ}\text{C}$) и УНТ ($+300^{\circ}\text{C}$) и др.

По данным иностранной печати указанные клеи и их разновидности применяются в американском, английском, французском, голландском самолетостроении. Ими, в частности, оконные рамы приклеиваются к стенкам фюзеляжа, а стрингеры — к фюзеляжным панелям. Методом склеивания изготавливаются также лопасти вертолетных винтов.

При выборе клея для соединения конструктивных элементов необходимо принять во внимание как его склеивающую способность, так и условия, в которых будут работать клеевые соединения. Так, например, соединение может иметь высокий показатель прочности на сдвиг или на отрыв, но при сложных нагрузках этот показатель резко упадет. Важны также показатели реакции клеев на повышенные или пониженные температуры, на повышенную влажность и пр.

Клеи промышленного назначения выпускают в основном в жидком состоянии или в виде пленки. Видом клея определяется технология склеивания. Так, например, склеивание составами типа БФ, при обычных условиях находящимися в жидком состоянии, ведется при повышенной температуре. Это создает условия для постепенного испарения растворителя. Процесс осуществляется

в несколько этапов. Сначала на специально подготовленную поверхность наносится слой жидкого клея и высушивается в течение получаса при температуре $20\text{—}30^{\circ}\text{C}$ и еще до 20 мин — при температуре $+50^{\circ}\text{C}$.

В зависимости от требований к толщине клеевого слоя таких слоев может быть нанесено несколько. Затем проводится дополнительное просушивание при температуре $90\text{—}95^{\circ}\text{C}$. Такое последовательное высушивание слоев клея и ступенчатое повышение температуры обеспечивают хорошее удаление растворителя и препятствуют образованию пор. В результате клей на соединяемых поверхностях пребывает в отвержденном состоянии, и теперь для склеивания необходим подогрев — индукционный, например, или конвекционный. В последнем случае используются электронагреватели различных типов — со спиралью или лентами, а также стандартные ТЭНы (тепловые элементы).

С повышением температуры слои клея размягчаются, но он не становится текучим. Поэтому неровности на поверхностях не заполняются клеем без давления: склеиваемую деталь помещают в пневматический или гидравлический пресс. Среди используемых прессов имеются и пресс-формы с подогревом.

Иногда приходится отказаться от прессования — когда конфигурация или материал соединяемых элементов не выдерживает давления. Но следует помнить, что при этом прочность соединения менее высока.

Склеивание фенольно-каучуковыми клеями чаще всего также осуществляется с применением давления и подогрева. Если клей жидкий, его наносят в несколько слоев, высушивая каждый. Затем — собственно склеивание: прессование в течение двух часов с удельным давлением до $9,8\text{ Н/м}^2$ при температуре до $+190^{\circ}\text{C}$.

При использовании пленочного клея нужна особенно тщательная подгонка склеиваемых поверхностей, вообще имеющая большое значение для получения высококачественного соединения.

Для давления на склеиваемые фенольно-каучуковыми составами поверхности используются, помимо упомянутых выше, также автоклавы, винтовые зажимы и другие устройства. Прессование в автоклавах обычно осуществляют комбинацией вакуума и давления. Соединяемые изделия фиксируют в необходимом положении, покрывают диафрагмой и помещают в автоклав. Затем

из-под диафрагмы откачивают воздух, а внутрь автоклава подают сжатый воздух. Автоклавы оснащены змеевиком, в который подается пар для подогрева или холодная вода для последующего охлаждения.

Вообще же средства нагрева весьма разнообразны — это и теплоносители (горячая вода, пар), и элементы сопротивления, и терморadiационные печи, и контактные нагреватели, и ТЭНы. Применяются также индукционные и диэлектрические методы нагрева.

При серийном и массовом производстве небольших по объему деталей, склеиваемых без давления, процесс осуществляется на конвейере. Конвейер с определенной скоростью (время сушки) проходит по специальному каналу, оснащеному лампами инфракрасного излучения. Выходящие из канала изделия полностью склеены.

Несколько слов о методах нанесения клеев на соединяемые поверхности. При нанесении тонких слоев жидкого клея используют пульверизаторы. Более густые и пастообразные клеи наносят на поверхности соединяемых элементов кистями, шпателями, роликами. Нередко возникает необходимость наложить слой клея в труднодоступные места — как и при нанесении клея на узкие поверхности, применяются специальные шприцы (понятно, что речь идет о жидких клеях).

Пленочные клеи накладываются на подслои жидкого клея. Затем их прижимают роликовыми устройствами (часто с системами подогрева). Наконец, сотовые и другие сходные заполнители перед прокладкой между склеиваемыми поверхностями просто опускают в жидкий клей.

Все упомянутые процессы нанесения клея связаны с ручным трудом, они нелегко поддаются механизации. Однако вопрос их механизации стоит на повестке дня, в этой области ведутся определенные работы.

Высокие требования научно-технического прогресса к надежности, прочности, износостойчивости, герметичности соединения конструктивных элементов вызвали к жизни комбинированные методы — клеевинтовые, клееклепаные, клеесварные. Наиболее перспективным из них следует считать клеесварной способ (хотя достаточно широко применяются и другие).

Клеесварные конструкции получают тремя основными методами. Самый технологически простой заключается в следующем: детали сваривают, а зазоры заливают клеем. Можно использовать различные жидкие

клеи; в соответствии с рецептом клея выбирается режим отверждения (сушки). Метод применяют в тех случаях, когда главная цель не упрочнение конструкции, а высокая герметичность швов. Соединенные подобным образом детали часто затем подвергают гальванической обработке.

Второй способ получения клеесварных соединений — нанесение жидкого клея по всей поверхности и последующая сварка. Здесь наилучшим образом зарекомендовала себя точечная импульсная сварка. При этом важно так подобрать рецепт клея и режим сварки, чтобы сохранить целостность слоя и избежать возникновения в нем пористости. С другой стороны, следует помнить, что при сварке по сплошному клеевому слою клей должен быть достаточно жидким и легко выдавливаться под действием элементов сварочной системы. Наконец, импульс тока должен быть достаточно сильным, чтобы «пробить» слой диэлектрика, каким, как правило, является клей.

После завершения сварки изделие помещают в нагревательную камеру, где выдерживают до полного отверждения клея. При необходимости клеесварная деталь затем может быть анодирована, хромирована, никелирована и т. д.

При третьем способе сварка ведется через отверстие в предварительно наложенной клеевой пленке. Отверстия в пленке несколько больше площади контакта электродов, проделываются с помощью трафарета. Затем пленку накладывают на поверхность соединения и фиксируют. Сверху кладется вторая деталь. Сварка — импульсная, точечная — также ведется с помощью трафарета. Главным недостатком метода — плохая герметичность соединения, в связи с чем приходится дополнительно заливать жидкий клей.

* * *

На этом, пожалуй, можно закончить краткий обзор методов соединения материалов. Конечно, обзор далеко не полон. Не рассказано о некоторых видах сварки (например, о специфической области сварки цветных металлов), о рецептах промышленных клеев и о многом другом. Но это, очевидно, и понятно: такое всестороннее раскрытие темы под силу только большому коллективу авторов, причем специалистам во многих областях

современной техники. Автор и не ставил перед собой такую цель, у него была более скромная задача: показать читателю — научно-технический прогресс создал столь обширное разнообразие способов соединения материалов, что среди них можно найти неосуществимое средство для решения самой сложной и неожиданной технической проблемы в этой области.

Заключение

«На чем держится мир?» Этот вопрос задавали себе мыслители древности. Этот вопрос задавали и задают себе поэты всех времен и народов. И отвечали, понятно, на него весьма по-разному. Первые в наивно механическом смысле: «на трех китах», «на слонах, стоящих на спине гигантской черепахи». Вторые в смысле поэтическом и аллегорическом: «на любви», «на верности идеалам».

Зададим себе такой вопрос и мы — в связи с темой настоящей брошюры. Думается, мы вправе, не боясь преувеличения, ответить на него так: вся наша материально-техническая цивилизация «держится» на соединении материалов.

Действительно, куда бы мы ни кинули взгляд, мы везде и всюду увидим системы и конструкции, состоящие из соединенных друг с другом элементов. Здания наших городов и поселков построены из скрепленных крупных блоков или из связанного раствором кирпича. Технологические и транспортные машины состоят из сваренных или привинченных друг к другу узлов. Мебель в нашей квартире собрана из склеенных элементов, наша одежда сшита из раскроенных кусков ткани. Мосты и железные дороги, гигантские океанские суда и точнейшие приборы в научных лабораториях, мачты электропередач и резервуары для хранения нефти — все они из сочлененных деталей, узлов, конструктивных элементов. И все перечисленные элементы надо ведь соединить...

И поэтому заканчивая наш рассказ о соединении материалов, мы приведем еще несколько примеров последних «событий» в этой области.

Рассказывая о сварке взрывом, мы подчеркивали, что сегодня это направление еще не вышло из стадии эксперимента, что опыты ставятся пока либо в лабораториях — при ограниченной силе взрыва, — либо на по-

лигонах. При этом была выражена уверенность, что уже в недалеком будущем сварка взрывом проложит себе путь в промышленную практику.

И вот в начале 1975 г. появилось сообщение: в недрах рудоносных гор в районе Зырянска, что на востоке Казахстана, приступила к работе промышленная лаборатория по сварке металлов взрывом. Она создана Зырянским свинцовым комбинатом в содружестве с учеными из Новосибирска и Барнаула.

Эта не совсем обычная промышленная лаборатория размещена в камерах на двухсотметровой глубине, откуда извлечена богатая полиметаллическая руда. Первые серии экспериментов, проведенные коллективом лаборатории, дали хорошие результаты: отработана технология соединения взрывным методом стали с бронзой, стали с алюминием, стали с титаном, титана с медью. Сварка взрывом сделала еще один шаг на пути к широкому промышленному использованию.

* * *

Во всем мире ученые различных специальностей ведут сейчас поиск новых источников энергии, новых, более экономичных способов ее передачи, трансформации и использования. (К этому подключились даже астрофизики, призывающие всерьез подумать об использовании энергии так называемых малых «черных дыр», которые согласно некоторым теориям в скором времени будут обнаружены в сравнительно малой удаленности от Земли.) Не остались равнодушными к таким поискам и ученые-сварщики. В СССР и Японии, ГДР и США, ФРГ и Англии ведутся эксперименты, цель которых — научиться использовать воду в качестве источника тепла для сварки и пайки. Одними из первых успеха на этом пути добились ученые из многократно уже упоминавшегося Института электросварки АН УССР им. Е. О. Патона.

Здесь изучалась возможность использования обычного электролиза для выделения содержащихся в воде кислорода и водорода. Было доказано, что этот процесс ведет к образованию смеси газов в таком соотношении, которое необходимо для ее полного сгорания. При этом нет необходимости в специальных регуляторах смешивания.

Чистое пламя водородно-кислородного факела дает энергию, способную быстро нагревать соединяемые материалы до высоких температур. В лабораториях института уже проведено соединение новым методом деталей электронной аппаратуры — конденсаторов, диодов, транзисторов, интегральных схем. «Горючее из воды» оказалось пригодным также для резки, сварки и пайки проводов и фольги.

Новый метод привлекает ученых и производителей возможностью упростить и автоматизировать сварочный процесс, а также тем, что изготовление оборудования для реализации такой технологии несложно.

* * *

...В последнем издании «Оксфордского словаря английского языка» появился новый термин — «трайбология». Ему дано такое толкование: «наука и технология о взаимодействующих поверхностях, движущихся одна относительно другой». Трайбология как самостоятельная комплексная научно-техническая дисциплина зародилась в Англии. Сейчас там уже несколько лет успешно действует Национальный центр трайбологии. Объединяя в единый сложный комплекс физику и химию, металлургию и машиностроение, трайбология ставит перед собой ряд целей, главная из которых — обеспечить оптимальное функционирование движущихся элементов, будь то шарниры в окнах и дверях жилого дома или «солнечные паруса» космического корабля будущего, челноки ткацких станков или пластмассовые части искусственного сердечного клапана.

Группа ученых Центра трайбологии специализируется на исследованиях, связанных с изучением специфики поведения механизмов в условиях враждебной окружающей среды — под ядерным излучением, при очень высоких и очень низких температурах, при сверхвысоком давлении, в условиях открытого космоса и т. д.

Читатель, надеюсь, еще помнит о том, что рассказывалось выше о сварке трением — одном из перспективных направлений развития науки о сварке и сварочной технологии. Трайбология также уделяет внимание данной проблеме. Программа исследований и открытия держатся в секрете, однако нет сомнений, что в ближайшее время ученые — специалисты в области науки о

трении разных стран мира — внесут новый вклад в развитие теории и практики соединения материалов.

* * *

Недавно соответствующее ведомство США выдало патент изобретателю Ф. Перри на ультразвуковую швейно-сварочную машину. Рабочий орган машины — вибрирующий стержень. Вибрируя, этот стержень заставлял примыкающие к нему волокна одного из сшиваемых кусков материи совершать микроколебания и тереться о волокна второго куска. Выделяющееся тепло расплавляет волокна и надежно сшивает, вернее сваривает, раскроенную ткань. Производительность машины огромна: скорость сварки шва 15 м/мин.

Правда, швейно-сварочная машина Перри не лишена и недостатков. Прежде всего сварке поддаются лишь синтетические ткани — полиэфирные, нейлон и другие; хлопчатобумажные, шерстяные и шелковые ткани с ее помощью не соединишь. Кроме того, машина дорога — около 2500 долларов. Однако само появление такой машины, предназначенной для широкого пользования, симптоматично: раз уж люди научились делать ткани нового типа, синтетические, то должно было быть создано и устройство для шитья изделий из них, причем устройство тоже принципиально нового типа.

* * *

Важное научно-техническое открытие сделано на стыке сварки и металлургии. К уже известным методам электрошлакового и электровакуумного переплава прибавился еще один эффективный технологический процесс получения высококачественного металла — плазменно-дуговой переплав. Разработанный в Институте электросварки АН УССР им. Е. О. Патона новый метод позволяет получать стали и сплавы высокой чистоты.

Плазменно-дуговой переплав становится действенным орудием в руках советских металлургов, которым в завершающем году девятой пятилетки и в десятой пятилетке предстоит решение важных задач — повышение качества металла, расширение ассортимента продукции,

внедрение прогрессивных, более эффективных производственных процессов. 16 января 1975 г. в газете «Правда» был опубликован фотоснимок первой плазменно-дуговой печи. Новый метод уже сделал первые шаги от теории и лабораторных опытов к производственной практике.

Перечень подобных примеров можно было бы продолжать достаточно долго. Более того, тщательно подобранный комплекс примеров новостей в сфере соединения материалов мог бы составить интересную и энциклопедически разнообразную книжку-калейдоскоп, которая заслуживала бы отдельного, самостоятельного издания. Однако мы ограничимся изложенным выше, так как этого, по нашему мнению, в целом достаточно для того, чтобы сделать вывод: технические дисциплины и производственная практика, занятые проблемами соединения материалов, находятся на передовых позициях научно-технической революции.

ЛИТЕРАТУРА

Гитлевич А., Животинский Л., Клейнер А. Альбом механического оборудования сварочного производства. М., «Высшая школа», 1974.

Глизманенко Д. Сварка и резка металлов. М., «Высшая школа», 1974.

Громадский Б., Нехорошев А. Водолаз — сварщик — резчик. М., изд-во ДОСААФ, 1974.

Коровин А. Газопитание сварочных участков. М., «Машиностроение», 1974.

Крикунова И., Некрасов Ю. Газовая сварка пластмасс. М., «Машиностроение», 1974.

Куликов Г. Современные способы восстановления деталей наплавкой. Южно-Уральское кн. изд-во, 1974.

Методика испытаний на паяемость. М., издание ВНИИмаш Госстандарта СССР, 1974.

Механическое сварочное оборудование. Обзор. М., издание ВНИИмаш м-ва станкостр. и инструмент. пром-сти, 1974.

Оборудование для контактной сварки рельсов и его эксплуатация. Под ред. С. И. Кучука-Якименко. Киев, «Наукова думка», 1974.

Пацкевич И., Деев Г. Поверхностные явления в сварочных процессах. М., «Металлургия», 1974.

Сварочные флюсы и шлаки. Ред. коллегия: Б. Е. Патон и др. Киев, «Наукова думка», 1974.

Сычев М. Неорганические клеи. Л., «Химия», 1974.