

1968 · СЕРИЯ



6

ПРОМЫШЛЕННОСТЬ

А. А. Красновский
Р. Ф. Федоров

СОЕДИНЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

**А. А. КРАСНОВСКИЙ,
Р. Ф. ФЕДОРОВ**

Соединение материалов

Издательство «Знание» Москва 1968

6
K78

Введение

Вся наша материально-техническая цивилизация опирается на соединения материалов. В этом образном выражении нет ни малейшего преувеличения. Куда ни кинь взгляд — всюду увидишь различные конструкции, состоящие из соединенных между собой элементов: здания, построенные из связанного раствором кирпича или скрепленных крупных блоков, стальные мосты, собранные из сваренных деталей, транспортные или технологические машины, части которых сварены между собой или привинчены друг к другу, мебель из склеенных элементов, одежду, сшитую из кусков ткани, и т. д.

С необходимостью соединять конструктивные элементы в единое целое человек столкнулся на самой заре своей истории. Научившись привязывать заостренный камень к куску дерева, создал топор, прикрепив костяную пластинку к палке, получил копье, а освоив скрепление жилами кусков шкур, стал шить одежду. Потребности заставляли людей создавать новые орудия, а для этого нужны были новые материалы и новые методы их соединения.

Подлинную революцию в технике своего времени вызвало изобретение гвоздей, различных клеев, винта с гайками, способа клепки и, наконец, сварки металлов. Сварка металлических конструктивных элементов (а в последнее время и ряда неметаллов) до сих пор сохранила значение самого надежного, экономичного, универсального, технологичного способа соединения материалов. Развитие техники, разработка новых конструкций, освоение материалов с неизвестными ранее свойствами вызвали к жизни и новые способы соединения.

Сварка обогатилась методами холодного соединения (их, собственно, сваркой называют лишь по традиции), сварщики научились использовать ультразвук, радиочастотные излучения, поток электронов, световой луч оптического квантового генератора — лазера.

Однако в ряде случаев методы сварки оказываются непригодными или малоцелесообразными. Технический прогресс поставил задачу создания принципиально новых методов соединения для применения в промышленной и строительной практике. На помощь пришла химия. Были созданы клеи, способные чрезвычайно прочно соединять самые разнообразные материалы — металлы, стекло, пластмассы, полимерные пленки, различные бетоны. Разработаны рецепты клеев, «намертво» соединяющих разнородные материалы, например металл и стекло. Причем в ряде случаев место соединения имеет даже более высокие механические показатели, чем сами материалы. Впрочем, подобный эффект дают и некоторые методы сварки.

Прекрасные результаты дало совмещение указанных выше принципов в клеесварном способе соединения материалов. Клеесварные конструкции по праву считаются весьма прочными, а сам метод завоевал большую популярность и применяется сейчас в различных сферах производства — от машиностроения до строительства.

Прочность соединения, устойчивость шва к разного рода воздействиям — важнейшее условие надежности всей создаваемой конструкции. А поскольку современным машинам и механизмам приходится действовать в «тяжелых» условиях повышенных скоростей и нагрузок, в агрессивных средах и т. д., то понятно, какие жесткие требования предъявляет техника к соединениям. Понятно также, что от прогресса в области сварки, от создания новых, еще более эффективных клеев, от разработки новых методов соединения материалов в значительной мере зависят успехи в производстве, в строительстве, на транспорте, поступательное движение техники.

Настоящая брошюра познакомит читателя с наиболее широко применяющимися сейчас промышленными методами соединения материалов — от классических до самых новых. Будут затронуты также некоторые принципиальные проблемы, решением которых заняты практики и ученые. Понятно, что рамки небольшой брошюры не позволят охватить весь круг вопросов, связанных с проблемой соединения материалов. Так что речь пойдет о способах наиболее важных и интересных: о тех, которые широко распространены или, по мнению авторов, получат широкое распространение в недалеком будущем.

От электрической дуги до лазерного луча

Идею электросварки, т. е. метода соединения деталей с помощью мощного источника нагрева, которым служит электрический ток, впервые высказал в начале 80-х годов прошлого столетия талантливый русский изобретатель Н. Н. Бенардос. Он же предложил использовать вольтовую дугу, особенности и закономерности которой в 1803 г. описал В. В. Петров. И не только предложил, но и впервые осуществил на практике электросварку металлов с помощью вольтовой дуги, возникавшей между угольным электродом и свариваемым металлическим изделием.

Несколько позднее крупный ученый-металлург Н. Г. Славянов заменил угольный электрод металлическим, который, плавясь, поставлял в область, где происходит сварочный процесс, присадочный металл. Так началось поистине триумфальное шествие сварки.

Научно-техническое развитие в области электросварки шло по нескольким основным направлениям.

Первое — нужно было научиться защищать зону сварки от вредного действия газов воздуха, что, в свою очередь, необходимо для получения плотных и прочных сварных швов. Не останавливаясь на истории открытий, скажем только, что были найдены самые разнообразные способы и материалы защиты — обмазки электродов, которые, сгорая, образуют защитную сферу вокруг дуги; различные флюсы, подсыпаемые в зону сварки (идею защитного флюса предложил еще Н. Г. Славянов) и образующие здесь защитный шлаковый «пузырь»; инертные газы (аргон, гелий), которые прекрасно «работают» при методах и дуговой и контактной сварки (т. е. сварки без дуги, когда через свариваемые элементы пропускается электрический ток, нагревающий и расплавливающий их в месте контакта) и т. д.

Второе направление научных поисков связано с механизацией и автоматизацией сварочных процессов. Пионером в данной области выступил коллектив ученых Института электросварки АН УССР, которым руководил в те годы Е. О. Патон (сейчас институт носит имя этого выдающегося ученого). Проблема автоматизации сварки была в принципе решена на основе метода электросварки под флюсом.

Новый метод не сразу пробил себе дорогу, но уже в самом начале 40-х гг. наши машиностроители начинают внедрять в производство метод скоростной автоматической сварки под флюсом. Позднее, во время Великой Отечественной

войны, этот метод был использован при создании первого в мире сборочно-сварочного конвейера, с которого сходили столь необходимые защитникам Родины танки.

Третий комплекс научно-технических изысканий, направленных на совершенствование сварочных процессов и сварочной техники, ставил своей целью использование в этой области иных методов воздействия на свариваемые материалы, методов, исключавших применение электрического тока как источника нагрева.

Здесь следует подчеркнуть, что методы эти рождались не по прихоти ученых. В них была острая необходимость. Так, развитие ряда отраслей промышленности требовало способов сварки, позволяющих избежать нагрева свариваемых элементов, который пагубно влиял на качество создаваемых конструкций (например, в радиоэлектронике, приборостроении и т. д.). Нужны были и способы соединения металлов с неметаллами — со стеклом, например. Заказ развивающихся отраслей производства был выполнен: родилась группа методов холодной сварки. Среди них особое значение имеет диффузионная сварка в вакууме больших поверхностей, созданная группой ученых во главе с доктором технических наук Н. Ф. Казаковым (см. брошюру Н. Ф. Казакова «Диффузионная сварка в вакууме», серия «Техника», «Знание», 1966).

Дальнейшие исследования в этой области ведут Институт электросварки им. Е. О. Патона, ВНИИ электросварочного оборудования и другие научные и конструкторские учреждения. Холодная сварка позволила «соединять несоединимое» (материалы с весьма отличными параметрами), она легко поддается автоматизации, не требует сложного оборудования, способствует экономии электроэнергии, улучшению условий труда и т. д.

Ученые поставили на службу сварщикам ультразвук в качестве источника нагрева. Этот метод особенно пригодился тогда, когда производственникам пришлось в промышленных масштабах сваривать пластмассы и иные полимерные материалы. Ультразвук прекрасно соединяет и различные металлы: титан с алюминием, алюминий с нержавеющей сталью и медью, молибден с танталом и т. п. (см. главу «Сварка цветных и редких металлов и сплавов»). «Сваривать» можно взрывом. Плазменная резка подсказала идею плазменной сварки и наплавки. Новейшие открытия физиков используются создателями методов электроннолучевой сварки с помощью луча оптического квантового генератора — лазера.

Наконец, еще одно направление научно-исследовательских и конструкторских работ в области сварки ставит своей целью оптимизацию технологии сварочных процессов, разработку технических систем контроля и регулирования этих

процессов. Сейчас на советских и зарубежных предприятиях качество сварных швов контролируется с помощью электромагнитной дефектоскопии и рентгеновских установок, для этой цели используются инфракрасное излучение и ультразвуковые колебания; контролируют сварку и с помощью ПТУ — промышленных телевизионных установок. Что же касается оптимизации режима сварки, то здесь главная цель — создание самонастраивающихся автоматов, оснащенных современными электронными управляющими системами. В этой сфере не последнее слово принадлежит специалистам по автоматике, телемеханике, технической кибернетике...

Теперь, когда мы кратко познакомились с основными проблемами сварки, настало время перейти к рассказу об отдельных ее видах. Ясно, что «прокрустово ложе» небольшой брошюры позволит нам остановиться лишь на некоторых из них, а в описании этих методов затронуть только самые принципиально важные вопросы.

Автоматическая дуговая сварка под флюсом. При этом способе электрическая дуга, возникающая между металлическим электродом и свариваемым изделием, горит под слоем флюса — специального сыпучего вещества. Часть флюса под действием выделяемого дугой тепла расплавляется и образует на поверхности металлического расплава шлаковый покров. Этот покров защищает металл от вредного воздействия воздуха; металл не разбрызгивается и не выгорает. Кроме того, флюс способствует концентрации тепла, мешает его бесполезному 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 — свыше 3 тыс. а.

Еще одно преимущество данного вида сварки заключается в том, что защищенный флюсом расплавленный металл остывает медленно; это создает хорошие условия для формирования шва, из которого успевает выделиться большая часть шлака и газов. Однако главное достоинство сварки под флюсом в том, что этот метод позволил автоматизировать сварочный процесс, изготовление многих сварных конструкций перевести на поток. Так, внедрение в производство автоматической сварки под флюсом в корне изменило технологию промышленного изготовления котлов и корпусов судов, тонкостенных труб большого и малого диаметра, различных металлоконструкций и т. д.

Возьмем для примера судостроение. Здесь сварочные операции, составлявшие по трудоемкости весьма значительный процент всех работ, долгое время производились непосредственно на стапелях, в очень неудобных условиях. Автомати-

ческая и полуавтоматическая сварка под флюсом коренным образом изменила положение. С самого начала работы над будущим речным или морским судном, уже при составлении проекта, его создатели разрабатывают корпус из ряда больших секций (вес последних может достигать 400—500 т — в зависимости от водоизмещения судна, мощности имеющихся в распоряжении судостроителей кранов и т. д.). Такие секции изготавливают в заводских условиях, что позволяет использовать сварочные автоматы.

На стапеле выполняются только монтажные соединения блоков — 0,2% всех сварочных работ.

Ясно, что все это позволило значительно сократить сроки постройки судов, снизить общую трудоемкость судостроительных работ и необходимые расходы. Сейчас с цельносварными корпусами строятся суда и малые и большие. Достаточно сказать, например, что изготовленный из особых высокопрочных сортов стали корпус флагмана советского Северного флота, первого в мире атомного ледокола «Ленин» — цельносварной.

Как уже говорилось, сварка под флюсом позволила автоматизировать процесс изготовления тонкостенных труб, в частности тонкостенных труб большого диаметра для магистральных трубопроводов (оговоримся, что для их изготовления применяются также методы контактной сварки, о которой речь пойдет дальше). Эти трубы изготавливают в настоящее время двумя основными способами — сваркой продольной и по спирали.

Первый способ, разработанный Институтом 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 газопроводных или нефтепроводных труб большого диаметра работают сейчас на многих заводах страны.

Технология автоматической сварки под флюсом труб спиральным швом была впервые предложена сотрудниками ЦНИИТМАШа. Здесь же была разработана конструкция специального трубосварочного стана, состоящего из двух частей — формовочной и сварочной. Из самих названий этих агрегатов ясно, что первый предназначен для сворачивания трубы из стальной ленты, а второй — для сварки этой ленты. Оба агрегата работают непрерывно и автоматически. Причем 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).

Главное преимущество метода спиральной сварки труб в

том, что он позволяет из узкой металлической ленты сваривать трубы любого необходимого диаметра. Кроме того, в спирально сваренной трубе шов испытывает значительно меньшую нагрузку (от давления перекачиваемого продукта, например), чем шов продольно сваренной трубы.

Автоматическая 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 трубы длиной примерно по 10 м каждый, т. е. на 1 км приходилось до 100 стыков.

Согласно же новой технологии доставленные к месту строительства восьми-десятиметровые трубы попадают на одну из расположенных вдоль трассы строительства баз, оснащенных полустационарными установками для автоматической сварки под флюсом. Здесь трубы сваривают 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 плети. Количество стыков, свариваемых вручную, уменьшилось до 5% от общей длины сварных швов. Ясно, что сроки строительства трубопроводов сократились, а производительность сварочных работ значительно возросла.

С тонкостенными трубами небольшого диаметра сварщики предложили поступать иначе. Сотрудники Института электросварки им. Е. О. Патона разработали метод изготовления таких труб из двух металлических лент, которые накладываются друг на друга и свариваются по краям. Затем эта плоская двухслойная лента сворачивается в компактные рулоны; транспортникам теперь нет нужды «перевозить воздух». На месте укладки рулон, длина ленты в котором нередко достигает 1 км, раскатывается, после чего внутрь заготовки под давлением подается воздух. Плоская заготовка становится цилиндрической, т. е. трубой. Выбор метода сварки плоских заготовок для будущих труб зависит от толщины стальной ленты. Так, для ленты толщиной меньше 2 мм подходит контактная шовная сварка, а при толщине стенки будущей трубы больше 2 мм — дуговая сварка под флюсом.

Новые методы автоматической сварки удешевили изготовление и улучшили качество резервуаров большой емкости. «Классический» (и весьма малопродуктивный) метод их изготовления (резервуары вручную сваривали из стальных листов на монтажной площадке) не отвечал современным тенденциям в технике и растущим потребностям народного хозяйства.

В последние годы такие резервуары изготавливают следующим образом. Стенка будущего резервуара, днище и верхнее покрытие свариваются на заводе методом автоматической сварки под флюсом. Затем полотнища стенки, дна и крыши скатываются в плотные рулоны, которые удобно доставлять к месту строительства. Здесь их разворачивают с помощью лебедок и тракторов, собирают и сваривают. В результате протяженность швов, которые свариваются на строительной площадке, уменьшается в десятки раз.

Качество сварки, которая в основном осуществляется в заводских условиях, стало значительно выше, строительномонтажные работы длятся уже не месяц—полтора, а всего несколько дней.

Автоматическая сварка под флюсом прекрасно зарекомендовала себя и при создании многих других крупногабаритных конструкций. Именно этим методом возведены металлические каркасы современных высотных зданий, кожухи доменных печей (например, в Запорожье), многие мосты (следует упомянуть, что первым цельносварным мостом в нашей стране был автодорожный мост им. Е. О. Патона через Днепр в Киеве) и т. д..

Автоматическая сварка под флюсом широко используется также на предприятиях разных отраслей машиностроения. С ее помощью изготавливают узлы буровых установок шагающих экскаваторов, прокатного оборудования, самые крупные гидротурбины, различные вагоны, тепловозы, цистерны, котлы, воздухонагреватели, подъемно-транспортные машины и т. д.

Нужно сказать, что в тяжелом машиностроении применяется не только сварка под флюсом, но и электрошлаковая сварка. Хорошие результаты при изготовлении некоторых конструкций дает объединение разных методов — например, сварки и литья, сварки и штамповки. Подобные комбинированные методы позволяют добиться значительной экономии металла и сокращения цикла производства.

Однако вернемся непосредственно к автоматической сварке под флюсом и кратко остановимся на том оборудовании, с помощью которого этот процесс осуществляется. Весьма прогрессивной системой, используемой в сварочном деле, является так называемый сварочный трактор. Этот маневренный аппарат (автоматическая сварочная головка, которая смонтирована на самоходной тележке с собственным электродвигателем) хорошо работает при сварке таких изделий, как элементы резервуаров для нефти, большие плоские секции, длинные балки, металлические сосуды больших диаметров и т. д. Сварочные тракторы могут передвигаться по специальному переносному рельсу, который укладывается вдоль

шва перед началом сварочной операции, и непосредственно по свариваемому изделию.

Советская промышленность выпускает ряд моделей сварочных тракторов, которые позволяют автоматизировать многие операции при сварке изделий под флюсом. Уже давно в промышленности используется, например, универсальный сварочный трактор ТС-17М, с помощью которого удалось автоматизировать сварку под флюсом внутренних кольцевых швов в сосудах и трубах большого диаметра, сварку продольных швов различных колонн и балок. ТС-17М — небольшой, легкий, надежный аппарат. Он снабжен набором сменных приспособлений, которые позволяют получать сварные швы того или иного типа — в зависимости от требований к конструкции. На заводах тяжелого машиностроения и на строительно-монтажных площадках можно увидеть универсальные сварочные тракторы типа УТ (УТ-2000М, УТ-1250 и др.).

Кроме универсальных сварочных тракторов, советская промышленность выпускает и специализированные, предназначенные для выполнения какой-то одной, вполне определенной операции. Производство таких машин вполне оправдано, так как на многих предприятиях ряд сварочных операций осуществляется непрерывно и в больших масштабах. Так, например, в судостроении большую роль (как по значению, так и по объему) играет сварка полотнищ судовых конструкций. Здесь используется, например, специализированный сварочный трактор ТС-32, сконструированный в Институте электросварки им. Е. О. Патона. С помощью этого аппарата удалось значительно поднять производительность труда, сократить расходы электроэнергии и флюса.

Трактор ТС-32 осуществляет сварку стыковых швов (одностороннюю) на скользящей красно-медной подкладке. Особое устройство «следит» за точным совмещением свариваемых листов, а также обеспечивает формирование шва с двух сторон. Применение метода сварки на скользящей подкладке очень выгодно: исчезает необходимость в сооружении сложного оборудования — таких, например, устройств, как магнитные стенды и т. д.

Важнейший узел всякой установки для автоматической дуговой сварки под флюсом — автоматическая сварочная головка. Ее функции заключаются 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.

Советские ученые и производственники разработали ряд удачных конструкций автоматической сварочной головки. Среди них необходимо отметить одну конструктивно несложную и надежную — простой редуктор, сообщающий необходимое число оборотов тем роликам, которые подают проволоку. Что касается дуги, горящей под флюсом, то она саморегулируется (это явление имеет место при сварочных токах 1000 а и больше).

Автоматические сварочные головки используются не только как конструктивная часть сварочного трактора, о котором речь шла выше, но и непосредственно, в виде так называемых подвесных и самоходных сварочных головок. Подвесные головки исполняются в двух вариантах: для тех случаев, когда при сварке изделие закреплено — подвижные, если же изделие перемещается — неподвижные.

Отметим сразу, что для сварки продольных швов используются подвижные подвесные головки (устанавливаются, например, на велосипедных тележках). Кольцевые же сварные швы (различная нефтеаппаратура, паровые котлы и т. д.) получают с помощью неподвижных подвесных головок; в этих случаях вращается само изделие.

Самоходные головки, как говорит уже само название, оснащены самоходным механизмом. Одна из важнейших сфер их применения — автоматическая сварка под флюсом длинных балок. Самоходные сварочные головки (такие, как ССГ-3, созданные коллективом ЦНИИ технологии машиностроения) используются также для сварки внутренних кольцевых швов в объемах большого диаметра.

При этом скорость подачи электродной проволоки и скорость перемещения самой головки регулируются плавно, постепенно, бесступенчато. К тому же скорость движения головки можно менять, не изменяя скорости подачи электрода, что дает возможность варьировать их соотношение и добиваться технологически необходимого режима сварки. Важно, что та же головка ССГ-3 пригодна и для сварки кольцевых швов. Это позволяет, например, сваривать барабан котла — и кольцевые и продольные швы — с помощью одного аппарата.

Помимо упомянутых выше сварочных тракторов и автоматических самоходных и подвесных сварочных головок, имеется целый ряд других сварочных автоматов и полуавтоматов. Среди них особый интерес представляют системы для двухдуговой сварки, технология которой была впервые в мире разработана советскими учеными — сотрудниками Института электросварки им. Е. О. Патона.

Если при однодуговой сварке одна дуга между электродом и свариваемым изделием как проплавляет основной металл, так и формирует шов, то при двухдуговой сварке эти задачи решаются с помощью двух дуг. Первая (между вертикально расположенным электродом и изделием) проплавляет металл, а вторая (между наклонным ко шву электродом и изделием) формирует шов, участвуя в то же время и в проплавлении основного металла (ясно, что в каждой дуге возможно применение более слабого тока, чем при однодуговой сварке).

Такое распределение функций, позволяет добиться того, что обоим дугам даже в сумме нужен меньший электрический ток, чем при сварке одной наклонной дугой. Важно также, что для двухдуговой сварки могут использоваться источники питания сравнительно небольшой мощности. В то же время этот 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. Важно только, чтобы оба электрода — вертикальный и наклонный — перемещались последовательно и синхронно, сохраняя постоянное расстояние между собой.

Вообще расстояние между дугами существенно влияет на качество сварочного процесса и сварочного шва. Оптимальные результаты, как показала практика, дает такое взаимное расположение электродов, когда они отстоят друг от друга на 4—5 см.

Весьма перспективна также сварка двумя электродами с питанием трехфазным током. Идея этого способа была выдвинута еще в начале XX в. русским ученым В. Ф. Миткевичем. Практически сварку трехфазной дугой разработала в 30-х годах группа советских ученых во главе с Г. П. Михайловым. Сварка трехфазной дугой позволяет добиться более высокой производительности, экономить электроэнергию, равномерно загружать электросеть.

В чем же технический смысл и специфика данного метода? При сварке трехфазной дугой 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, горящая между электродами, способствует быстрому расплавлению электродного металла. В том случае, если одна из двух основных дуг погаснет, дуга между электродами автоматически гасится с помощью специального магнитного контактора. И зажигается дуга автоматически, как только электрод соприкасается с основным металлом.

В каждой фазе ток регулируется отдельным дросселем.

В качестве источника тока используют специально выпускаемое промышленностью для этого способа сварки трансформаторное оборудование. Однако его можно заменить и стандартными однофазными трансформаторами соответствующей мощности.

Важное достоинство метода в том, что можно в весьма существенных масштабах менять распределение энергии между электродами и свариваемым изделием. Изменяя ток в каждой из трех фаз, сварщик получает возможность регулировать процесс, чтобы расплавление электродного и основного металла осуществлялось, как этого требуют характеристики свариваемых металлов или сплавов.

Кроме того, регулируя подачу тока по фазам, можно повысить ток в дуге между электродами, не увеличивая и даже уменьшив при необходимости ток в дугах между электродами и свариваемым изделием. В этом случае электроды расплавляются значительно быстрее, нежели проплавляется основной металл и возрастает скорость наплавки. Простота регулирования теплового режима при сварке трехфазной дугой позволила применить этот метод для получения сварных конструкций из специальных сталей. Весьма 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. Данные автоматы позволяют осуществлять сварочный процесс с весьма большой скоростью.

До сих пор, говоря о сварке, мы в основном имели в виду формирование сварочного шва в горизонтальном положении. Однако в ряде конструкций совершенно необходимо осуществлять вертикальную сварку. Мосты и каркасы домов, корпуса кораблей, кожухи доменных печей и воздухонагревателей без вертикальных швов не сварить. Долгое время сварщики не могли автоматизировать такие сварочные процессы, ибо не знали, как при вертикальном положении сформировать расплавленный металл в шов, как удержать жидкий шлак на вертикальной плоскости и т. д. Поэтому приходилось пользоваться ручной сваркой, что было сложно, дорого и не позволяло повысить производительность сварочных работ.

И снова на помощь производственникам и строителям

пришел Институт электросварки им. Е. О. Патона. Именно здесь был создан способ автоматической вертикальной дуговой сварки под флюсом. Специалисты института разработали и конструкцию специального формовочного устройства — медного, охлаждаемого током воды, — с помощью которого осуществляется принудительное формирование вертикального шва.

Автоматическая сварочная головка, оснащенная этим устройством, медленно движется снизу вверх, оставляя за собой ровный прочный шов. Причем шов этот, как оказалось, обладает повышенными механическими свойствами по сравнению со швом, полученным при горизонтальной сварке. Происходит это вот почему. 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, порождающий низкие механические качества шва. Именно здесь при нагрузках появляются трещины.

В вертикальном же сварном шве кристаллы растут вдоль стен ванны, стык кристаллов не образуется, значит нет и области, которая снижает прочность всего шва. Второе обстоятельство: ускоренный отвод тепла медным формовочным устройством благоприятно влияет на охлаждение шва, что 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. Под действием постоянного притока тепла он все время находится в жидком состоянии, благодаря чему создаются условия для выхода газов, которые образуются в процессе сварки.

В заключение рассказа об автоматической сварке под флюсом необходимо упомянуть еще об одной ее разновидности — о шланговой полуавтоматической дуговой сварке. Сварочные тракторы и другие автоматы не везде можно применить; 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. Авторы этого метода — сотрудники Института электросварки им. Е. О. Патона и работники Ленинградского завода «Электрик». Как справедливо отметил А. А. Чеканов в своей книге «Современные методы сварки», шланговая сварка удачно «сочетает в себе маневренность ручной и преимущества автоматической сварки».

Эти достоинства обусловили ее достаточно широкое рас-

пространение в некоторых отраслях промышленности, например в судостроении. Однако в ряде случаев она из-за своей сравнительно невысокой производительности нерентабельна.

Суть метода шланговой полуавтоматической сварки под флюсом заключается в следующем. Сварка ведется пистолетом-держателем, который находится в руке сварщика. От держателя идут 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.

Бывают случаи, когда дуговая сварка под флюсом (так же, как и электрошлаковая сварка или сварка в защитной газовой среде — об этих способах речь пойдет ниже) непригодна по тем или иным причинам, невыгодна. Выход из таких положений был найден с разработкой еще одного вида дуговой сварки — полуавтоматической сварки открытой дугой. Это название звучит несколько неожиданно: до сих пор мы все время говорили о защите зоны сварки, и вдруг — открытая дуга. Но название «открытая» неточно. 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 к ней присоединилась обычная, сплошная электродная проволока, в ее состав вводятся (в качестве соответствующих примесей) вещества, защищающие дугу и улучшающие механические показатели шва.

Нередко при освоении какого-то нового изделия, производство которого не обходится без сварочного процесса, специально разрабатываются устройства для автоматизации сварки. Так, в Кемеровском институте МНИПТИМАШ создано приспособление для сборки и сварки звеньев двухэлементной разборной цепи скребкового угольного конвейера. Эти цепи изготавливают так: горячей штамповкой из стали марки 45Г2 (с последующей калибровкой) получают полузвенья; затем их сваривают двумя продольными швами; остается соединить звенья специальными валиками — и цепь готова. Проблема высококачественных, прочных соединений при изготовлении очень важна: цепь должна выдерживать тяговое усилие, превышающее 35 т.

Надо сказать, что сталь 45Г2 сваривается плохо.

Другая сложность сварочного процесса — малая протяженность конструкции. Кроме того, при ручной электродуговой сварке в начале и конце шва образуются слабые участки; увеличить же время нагрева начала и конца швов нель-

зя, так как это вызывает стекание расплавленного металла и образование наплывов, которые усложняют, а иногда делают вообще невозможным соединение звена с валиком. Сборочно-сварочное устройство, позволившее применить для сварки звеньев цепи электродуговую автоматическую сварку под флюсом, помогло справиться с этими трудностями.

По новой технологии сварка производится автоматом АДС-1000-2 (с усовершенствованным механизмом подачи электродов) при помощи многоэлектродной дуги, горящей под флюсом. Один из двух швов, короткий, выполняется тремя электродами, второй, длинный — шестью; флюсы, используются КС-11 и АН-348-А, соответственно. Стационарный источник тепла и защита зоны сварки флюсом предотвращают образование трещины в швах и в околосшовной зоне. К тому же флюс не позволяет металлу стекать у краев шва и в зазоры между деталями.

Повышение механических характеристик шва, достигнутое в результате применения новой технологии сборки и сварки звеньев, а также благодаря последующей закалке и отпуску деталей, значительно улучшило прочностные характеристики скребковой цепи. Как показали механические испытания, разрушающие нагрузки цепи новой конструкции не менее 37,5 т.

Этим частным примером использования в современном производстве автоматической электродуговой сварки под флюсом и ее благотворного влияния на технологию производства и качество изделия мы закончим рассказ о данном виде электросварки.

Следующая тема — **электрошлаковая сварка**. В связи с разговором об автоматической дуговой сварке под флюсом мы уже неоднократно упоминали об Институте электросварки им. Е. О. Патона. Авторы метода электрошлаковой сварки — также сотрудники этого института, разработавшие его в сотрудничестве с представителями ряда промышленных предприятий — Барнаульского котельного завода, Новокраматорского машиностроительного завода и др.

Главное назначение электрошлаковой сварки — соединение элементов крупногабаритных литых и кованных конструкций. Весьма эффективно она используется и для различных ремонтных работ, исправления дефектов в отливках и т. д. Так как при толщине деталей более 10 см автоматическая сварка под флюсом становится невыгодной, а при толщине свыше 30 см этим видом сварки хороший шов за один проход вообще получить невозможно, валы мощных гидротурбин, оборудование, паровые котлы сверхвысокого давления и другие крупногабаритные конструкции сейчас изготавливают с помощью электрошлакового способа.

Особенно это важно для тех случаев, когда вес или габариты крупных конструкций превышают возможности литейных и кузнечных цехов и их невозможно изготовить только литыми или коваными. Теперь же тяжелое оборудование могут выпускать заводы, которые не располагают большими литейными и кузнечно-прессовыми цехами. Благодаря внедрению электрошлаковой сварки в современных крупногабаритных тяжелых машинах и механизмах работают не литые и кованные узлы, а сварно-литые, сварно-кованные, сварно-прокатные.

Использование такого рода узлов позволяет разрабатывать более технологичные конструкции, более легкие и простые в изготовлении. Так что и заводы, где производят такого рода оборудование (в частности, заводы нефтяного, химического, тяжелого машиностроения и ряд других), проектируются иначе.

Вот сколь большие изменения вызвало внедрение электрошлаковой сварки. Хорошо зарекомендовала себя электрошлаковая сварка и при изготовлении биметаллических изделий точно заданного химического состава.

В чем же суть электрошлаковой сварки?

Сварочная ванна образуется кромками свариваемых деталей и двумя поверхностями шлакоудерживающего приспособления; последними могут служить, скажем, медные ползуны, охлаждаемые водой. В начальной, нижней части свариваемого стыка размещают специальное устройство (сварщики называют его начальными планками), служащее для возбуждения электрической дуги. Но описываемый нами вид сварки — не дуговой. Дуга нужна лишь для того, чтобы расплавить предварительно насыпанный в зону сварки флюс. Как только флюс расплавится, в дуге больше нет необходимости, электродуговой процесс прекращается. В расплавленный шлак ванны опускается металлический электрод. Через шлак, который при достаточно высокой температуре становится проводником, пропускают электрический ток, поддерживающий необходимый уровень температуры шлакового 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 ходе сварочного процесса 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.

Мы не случайно подчеркиваем, что сварочное устройство, шлаковая и металлическая ванны движутся вверх. Дело в том, что наиболее благоприятное положение шва, свариваемого электрошлаковым методом, — вертикальное (именно поэтому, кстати, пространство, ограниченное кромками свариваемых деталей и шлакоудерживающими медными ползунами, сварщики называют «шахтой»). Так что электрошлаковую сварку используют в основном для получения вертикальных швов (как уже отмечалось, при весьма большой толщине свариваемых элементов) за один проход. В тех случаях, когда толщина эта слишком велика для обычного метода, электроду придается не простое поступательное движение снизу вверх, а более сложное: электрод перемещается от одной стенки шахты к другой по глубине шва, одновременно постепенно поднимаясь вверх.

Элементы большой толщины можно сваривать также, увеличивая в соответствии с необходимостью количество электродов или используя электроды в виде толстых широких пластин. Хочется отметить, что производительность электрошлаковой сварки тем выше, чем больше толщина свариваемых деталей, и ограничивается лишь определенными технологическими факторами. Поступательное вертикальное движение формирующих шов ползунов, а также подача в зону сварки электродной проволоки осуществляются и регулируются специальным сварочным автоматом. При этом шлаковая и металлическая ванны сохраняют постоянное расположение относительно движущихся вверх ползунов.

Достоинства электрошлаковой сварки неоспоримы. О возможности однопроходного получения шва и высокой производительности процесса мы уже говорили. Высокое качество шва при электрошлаковой сварке объясняется следующими причинами.

Во-первых, происходящие между металлом и шлаком металлургические реакции значительно менее интенсивны, чем при дуговой сварке под флюсом. Понятно, что химический состав шовного металла получается более близким к заданному.

Во-вторых, этот состав легко регулировать, поскольку имеется возможность в широких пределах изменять интенсивность оплавления основного металла и устанавливать необходимое соотношение основного и электродного металла в расплаве, из которого формируется шов (потому, что основной металл нагревается значительно менее концентрированно, чем при дуговой сварке).

Третье обстоятельство — в верхней части постепенно наращиваемого вертикального шва постоянно находится ванна жидкого металла. Через него легко удаляются пузырьки

газа и всплывают частицы шлака, попадающие в металлический расплав. Таким образом, вероятность образования пор и других неплотностей в металле шва значительно меньшая, чем при горизонтальной дуговой сварке.

Наконец, большая часть тепла в процессе электрошлаковой сварки идет на нагрев кромок свариваемых деталей, околошовная же зона нагревается сравнительно медленно. Благодаря этому весьма неприятная для технологов опасность образования закалочных трещин в данной зоне уменьшается. Особенно это важно при сварке элементов из сталей, которые обладают повышенной способностью закаливаться.

Нельзя не сказать о высокой экономичности электрошлаковой сварки. Этот процесс дает немалую по сравнению с дуговой сваркой экономию металла, так как у свариваемых кромок не приходится заделывать скосы. Тем самым экономится и основной металл и электродный. Экономно расходуется и электроэнергия, так как уменьшается количество флюса, который необходимо поддерживать в расплавленном состоянии в шлаковой ванне.

Как и электродуговая сварка под флюсом, электрошлаковая сварка сегодня — это высокомеханизированный процесс. Советской промышленностью выпускается широкая номенклатура аппаратов электрошлаковой сварки для различных работ. В принципе конструкция таких аппаратов должна предусматривать наличие устройств, которые выполняли бы следующие операции: 1) осуществляли принудительное формирование шва и передвигали формирующие ползуны по мере поступательного вертикального движения шлаковой и металлической ванн; 2) подавали электроды в зону сварки; 3) перемещали электроды в «шахте».

Наличие формирующих швы устройств — отличительная особенность всякого аппарата для электрошлаковой сварки; кроме того, аппараты эти снабжены особой формы мунштуками для направления электрода в зону сварки между кромками свариваемых деталей.

Отличаются друг от друга основные типы аппаратов для электрошлаковой сварки главным образом способом (и соответствующим ему механизмом) передвижения вдоль шва. Одни из них, безрельсовые, перемещаются вдоль шва прямо по свариваемому изделию. Другие — по специальным направляющим, которые проложены параллельно шву, их принято называть рельсовыми. Есть и шагающие аппараты, крепящиеся к изделию магнитами.

К источникам питания при электрошлаковой сварке не предъявляют таких высоких требований, как при дуговой. Это связано с тем, что электрошлаковая сварка фактически бездуговая (напомним, что дуга нужна только в самом на-

чале процесса для расплавления флюса); нет необходимости в повторных возбуждениях дуги, в Высоком напряжении холостого хода и т. д.

Для питания аппаратов электрошлаковой сварки используют автотрансформаторы, изменяя напряжение в которых, можно регулировать интенсивность сварочного процесса (отметим сразу, что изменение уровня металлической ванны регулируется скоростью перемещения формирующих пластин и всего сварочного аппарата в целом). Эти трансформаторы имеют жесткие внешние характеристики и отличаются сравнительно небольшим весом, высоким к.п.д. и рядом других важных качеств. Поскольку для электрошлаковой сварки нужен трехфазный ток, можно пользоваться либо специальным трехфазным трансформатором, либо тремя обычными сварочными трансформаторами, соединенными по особой схеме.

Как уже говорилось, электрошлаковая сварка дает прекрасные результаты при соединении этого процесса в один технологический цикл с процессами литья иликовки для получения крупногабаритных конструкций. Литые конструкции больших размеров, — а размеры эти непрерывно увеличиваются в связи с постоянной тенденцией роста мощности машин в тяжелом машиностроении — на ряде предприятий получить невозможно: этого не позволяют ограниченные мощности и габариты литейных цехов. Кроме того, чем отливка крупнее, тем больше вероятность возникновения в ней неоднородностей металла, которые весьма заметно снижают ее качественные показатели. Известно также, что крупные литые детали еще зачастую формуются вручную, а это очень трудоемкий, малопроизводительный, тяжелый процесс. Наконец, большую сложность представляет окончательная механическая обработка отливок крупных размеров.

Со всеми этими трудностями было покончено, когда применение электрошлаковой сварки позволило из простых отливок, которые можно получать механизированной машинной формовкой, собирать конструкции практически каких угодно форм и размеров. Такие сварно-литые конструкции с помощью электрошлаковой сварки изготавливают в судостроительной промышленности (например, крупногабаритные элементы корпуса, вес которых нередко превышает 100 т). Уже первые опыты такого рода показали, что применение литейно-сварочного метода для производства ряда деталей корпусов судов уменьшает их стоимость по сравнению с литыми в два и более раза.

Хорошо зарекомендовала себя электрошлаковая сварка и в изготовлении сварно-литых элементов мощных прокатных станков, гидравлических прессов, статоров, гидротурбин, ковочно-штамповочных кривошипных прессов и т. д.

Машиностроителям известно, что коэффициент использования металла при изготовлении крупногабаритных деталей методом свободнойковки довольно низок. Так, 64-тонный вал турбины для Братской ГЭС был выкован из слитка, весившего больше 220 т. Огромное количество металла с таких поковок при окончательной обработке уходит в стружку.

При разделении же детали на элементы, которые выковываются и обрабатываются отдельно, а затем соединяются методом электрошлаковой сварки, расход металла значительно сокращается, резко снижается трудоемкость, более простой становится технология. В то же время повышается качество изделия. Теперь ковочно-сварочным способом изготавливают валы турбин, барабаны котлов сверхвысокого давления, бабы бесшаботных молотов, цилиндры шагающих экскаваторов и многое другое.

Электрошлаковая сварка применяется и в тех случаях, когда необходимо соединить элементы из проката толщиной 20—35 см. Именно таким способом производят, например, ряд деталей для гидравлических прессов. Электрошлаковая сварка линейных швов не отличается от описанной выше.

Некоторые особенности имеет процесс сварки кольцевых швов. В этом случае надлежащий выход шва осуществляют с помощью кокилей — выходных стальных или сменных медных. Кольцевой шов начинают варить от горизонтально расположенной заходной планки. Когда он сварен на четверть, планку вырезают, не прекращая сварки. Проведя еще четверть процесса, прихватывают планки выходного кокиля. Затем процесс продолжается до полного завершения.

Советские инженеры-сварщики научились применять электрошлаковую сварку для соединения и значительно более тонких элементов. Так, на Ленинградском судостроительном заводе им. А. А. Жданова этот метод использовался для сварки наружной обшивки бортовых секций судов из стали толщиной 1,4—2,4 см. В ходе экспериментов (в них приняли участие И. К. Железняк, Я. И. Вайнбрин, М. Е. Зазулин и другие) стало ясно, что электрошлаковая сварка листовой стали толщиной до 3 см имеет ряд особенностей и в судостроении, где сварные швы могут быть длиной 15 м и больше, требует специальной технологии и некоторого переоборудования сварочной аппаратуры.

Применявшиеся в стапельном цехе завода автоматы для электрошлаковой сварки типа А-612, А-612р, А-433р были переделаны так, чтобы наилучшим образом сваривать длинные швы в конструкциях из тонких стальных листов. Для этого из аппаратов были удалены механизмы, «заведывавшие» колебаниями электродов по глубине шва; в таких колебаниях теперь просто не было необходимости. Была скон-

струирована навесная головка для газовой вырезки зазора.

Заводские изобретатели переделали аппарат А-612 для движения по рейке и изготовили устройства дистанционной регулировки напряжения тока; специально сконструировали и изготовили всю оснастку для сборки и сварки швов наружной обшивки — гибкие рейки для движения автоматов вдоль шва, охлаждаемые шины принудительного формирования шва, сварочно-прижимные скобы.

Понятно, что рассчитанный на большую толщину свариваемых кромок аппарат в случае сварки тонколистовой стали может сваривать шов значительно быстрее. Но скорость его движения ограничивается механизмом ходовой тележки, рассчитанным на определенную скорость сварки. Для согласования этих параметров пришлось изменить устройство ходовой тележки, переделав ее червячную пару.

Однако электрошлаковая сварка стальных элементов небольшой толщины с повышенной скоростью не лишена недостатков. В частности, на автоматах нет надежной системы слежения за уровнем шлаковой ванны (напомним, что уровень этот поддерживается «сам собой» за счет согласования интенсивности сварочного процесса и скорости передвижения вдоль шва медных ползунов). Поэтому от сварщика требуется чрезвычайно внимательное наблюдение за уровнем шлаковой ванны.

Особые меры, направленные на то, чтобы избежать вытекания расплава, сварщики завода им. А. А. Жданова предлагают для тех случаев, когда свариваются сопряжения, расположенные поперек стыка, с переходом от большей толщины к меньшей. Это и специальные рычаги, прижимающие ползун к скосу, и некоторое увеличение скорости процесса с одновременным закрыванием зазора в верхней части ползуна специальным уплотнителем.

Одним словом, изобретатели Ленинградского судостроительного справились с основными трудностями внедрения новой технологии сварки наружной обшивки судовых корпусов. Их опыт показал, что метод электрошлаковой сварки при годовом объеме сварочных работ не менее 1500 м вполне пригоден для соединения элементов небольшой толщины. И не только пригоден, но и дает немалую экономию и значительное снижение брака.

Контактная сварка. Этот вид сварки имеет ряд весьма «грозных» для его «соперников» преимуществ. Во-первых, контактная сварка сравнительно легко поддается механизации и автоматизации. Затем при этом способе повышается прочность шовной зоны (почему это происходит, станет ясно дальше).

Кроме того, контактная сварка позволяет сберечь немало металла и получить изделия относительно более легкие (при сохранении должного уровня прочности и надежности). Снижение трудоемкости и стоимости сварных работ в случае применения контактной сварки в ряде областей техники — тоже достоинство данного метода.

Контактная сварка имеет и то преимущество, что она в равной мере применима для соединения элементов из черных и цветных металлов и различных сплавов, из пластмасс (о сварке цветных и редких металлов, пластмасс и полимерных пленок речь пойдет в последующих главах).

В настоящее время детально разработаны, оснащены разнообразным оборудованием и широко применяются несколько видов контактной сварки: точечная, роликовая (шовная) и стыковая.

Для предприятий электронной промышленности и приборостроения особый интерес представляет точечная контактная микросварка; разработаны и другие способы контактной сварки. В области точечной сварки, которой сейчас в промышленности надежно соединяют практически любые металлы и сплавы, достигнут высокий уровень автоматизации сварочного процесса. Так, советская промышленность выпускает высокопроизводительные машины типа МТП для точечной контактной сварки малоуглеродистой стали. Эта машина позволяет сваривать металлические изделия большой толщины.

Детали из нержавеющей стали надежно свариваются аппаратами типа МГППГ и МГПР. Особенно известны машины второго типа. Большой полезный вылет (свыше 3 м) позволяет сваривать крупногабаритные изделия, а то, что электроды имеют радиальный ход, способствует удобству эксплуатации. Для тех случаев, когда какие-либо детали и узлы по тем или иным причинам не могут быть перенесены к стационарным машинам точечной сварки, наши заводы производят портативные сварочные клещи разных типов и мощностей.

Очень удачна конструкция сварочных клещей, созданных Институтом электросварки им. Е. О. Патона. Сравнительно малый вес, удобное соединение с малогабаритным и легким трансформатором, наличие системы водяного охлаждения, небольшая потребляемая мощность, высокая производительность — все это делает сварочные клещи данной конструкции замечательным инструментом.

Однако при ряде сварочных работ клещи все же сварщиков не удовлетворяют, например, при сборке машин. Тогда в дело вступают подвесные механизмы для точечной сварки. Поскольку в отличие от сварочных клещей эти аппараты крепятся на подвеске и вес их так строго не ограничивается, трансформаторы выполняются встроенными в них.

Подвесные машины для точечной сварки часто используются в комплекте. Тогда одно изделие с большей свариваемой площадью обрабатывается одновременно не одним, а несколькими сварочными механизмами, что значительно повышает производительность труда, убыстряет технологический процесс.

И все же машиностроители хотят работать еще быстрее, еще производительнее. Этой цели служат машины для многоточечной сварки, получающие все более широкое распространение в ряде отраслей машиностроения. Правда, такие машины узкоспециализированы, строго приспособлены к определенным изделиям, к их габаритам и конфигурации. Но при многосерийном производстве это вполне закономерно. Зато машины эти сваривают многие десятки тысяч точек в час.

Другое их важное достоинство заключается в том, что в одном положении, не перемещая изделие, можно сваривать самый сложный профиль. Подобные профили при небольшой толщине материала часто коробятся, если их передвигают в процессе сварки. При использовании многоточечных контактных сварочных машин этого, естественно, не происходит и изделия не нуждаются в дополнительной правке.

Автомобили и вагоны, тепловозы и электровозы, сельскохозяйственные машины, а также, например, пакеты статоров и ряд других изделий изготавливают сейчас способом многоточечной сварки. Ясно, что для столь широкого диапазона процессов нужна и достаточно обширная номенклатура аппаратов для сварки. И она создана в отечественных институтах, из которых особо надо выделить ВНИИЭСО и конструкторские бюро автомобильных и вагоностроительных заводов.

Все машины этого типа, также впрочем, как и упомянутые выше другие системы точечной контактной сварки, снабжены различными средствами автоматизации сварочных процессов. Это и электронные регуляторы, изменяющие токи по заданной программе, и работающие по определенным программам разнообразные регуляторы времени сварки, и системы автоматического регулирования, снабженные датчиками, чутко реагирующими на тепловое расширение ядер сварных точек.

Среди «профессий» точечной контактной сварки следует особо отметить производство арматуры для железобетонных конструкций. Дело в том, что изготовление арматурных изделий долгое время не носило индустриальный характер: сначала арматуру «вязали», потом научились сваривать, но лишь методом ручной сварки. Применение для этой цели точечной сварки позволило создать поточные линии по изготовлению арматуры. В результате значительно сократилась трудоемкость операций и стоимость работ, улучшилось ка-

чество сварной арматуры, уменьшились сроки строительства крупных сооружений — гидротехнических и других.

Значение индустриализации изготовления арматуры тем более велико, что размеры ее производства и потребления в нашей стране, так много строящей, поистине огромны: за год у нас свариваются миллионы монтажных стыков арматурных стержней. Контактная сварка применяется в производстве арматуры из стержней диаметром от 0,4 до 100 мм. В Советском Союзе работает множество автоматических линий точечной сварки разнообразных плоских и рулонных сеток, еще больше автоматов, сваривающих арматуру из стержней сравнительно большого диаметра, тысячи машин для контактной сварки пространственных каркасов и сеток.

Второй вид контактной сварки, о котором мы хотим рассказать, — шовная, или роликовая, сварка. Она успешно применяется в различных отраслях индустрии — вагоностроительной, автомобильной, для производства всевозможных бидонов, баков, 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. Вместо обычных электродов применяются ролики, между которыми протягивается свариваемый стык (отсюда и название — роликовая). Для ускорения процесса роликовой сварки Институт им. Е. О. Патона разработал особый способ шовной сварки, так называемый рельефный. 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. Выше, когда речь шла об электродуговой сварке под флюсом, мы говорили о сварном производстве плосковорачиваемых труб. Прекрасно зарекомендовал себя в этой области и метод роликовой сварки, в частности, рельефной. Металлические трубы, эти артерии современного производства, стали изготавливать еще более быстро и качественно.

Весьма интересные машины-автоматы для роликовой сварки выпускаются и за рубежом — в США, Чехословакии, Германской Демократической Республике, 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.

Значительные успехи достигнуты и в развитии еще одной разновидности контактной сварки — стыковой. Стыковая

сварка оплавлением широко применяется для соединения элементов из углеродистых и легированных сталей, чугуна, различных сплавов, цветных металлов. Этим методом свариваются рельсы и трубопроводы, стыки толстостержневой арматуры и листовой металл, ободья колес и стержневые заготовки клапанов автомобильных двигателей, крестовины железнодорожных стрелок и многое другое.

Очень выгодно, в частности, применение стыковой сварки в строительстве магистральных трубопроводов. При этом особое значение этот метод приобрел после того, как Институт электросварки им. Е. О. Патона в свое время создал принципиально новый способ стыковой сварки оплавлением — с использованием кольцевых трансформаторов. Сердечник таких трансформаторов охватывает подлежащее сварке изделие по всему контуру (периметру), вторичная обмотка трансформатора, которая состоит из нескольких параллельных витков, подводится непосредственно к изделию. Теперь сварочный ток равномерно распределяется по сечению изделия; это очень важно для сварки изделий большого сечения, какими являются, в частности, трубы магистральных нефте- и газопроводов. Кроме того, кольцевые трансформаторы способствуют увеличению интенсивности оплавления свариваемых кромок. Все это значительно ускоряет и удешевляет процесс. По сравнению с обычными стыковыми сварочными устройствами машины с контурным сердечником потребляют в несколько раз меньше мощности.

Сварка трубопроводов стыковым методом осуществляется так. Контактнo-стыковой трубосварочный агрегат устанавливается на тракторе. Здесь же монтируется стрела, на которой подвешивается кольцевой трансформатор. Самоходная сварочная установка передвигается по трассе прокладки магистрального трубопровода от стыка к стыку. С помощью трубоукладчика новый отрезок трубы располагается в стык к предыдущему. В нужное место трансформатор подается стрелой. Включается ток, стыкуемые торцы труб интенсивно оплавляются; одновременно осадочный механизм сжимает их, и вот уже к нитке трубопровода приварен очередной отрезок. Когда плеть достигнет заданной длины, ее укладывают в траншею. По данным ВНИИСТ, внедрение контактно-стыковой сварки с помощью кольцевых трансформаторов вместо автоматической сварки под флюсом сразу дало на каждую тысячу километров трубопровода диаметром 529 мм несколько сотен тысяч рублей экономии — за счет снижения стоимости сварочно-монтажных работ и значительного повышения производительности труда.

Контактную сварку в зависимости от типа свариваемых материалов и назначения изделия можно вести как без за-

щиты сварочной зоны (благодаря большой скорости процесса), так и с защитой. Причем применяются различные методы защиты, вплоть до целлофановой пленки, зажимаемой перед сваркой торцами труб, и раствора нитроцеллюлозы в метиловом спирте или амилацетате, который в виде густой массы наносится на торцы и внутреннюю стенку трубы в зоне нагрева; при сварке эти вещества, разлагаясь под действием высокой температуры, образуют хорошую защитную газовую среду. Газы и непосредственно работают при контактной сварке в качестве «защитников». Однако главная сфера их применения в такой роли — **дуговая сварка в среде защитных газов**.

Первый газ, который был использован для защиты сварочной зоны, — аргон: в самом конце 30-х годов в США был разработан способ аргоно-дуговой сварки. Советские ученые-сварщики также работали над этим методом. Война с гитлеровской Германией несколько задержала завершение ряда перспективных исследований. Но уже в 1947—1948 гг. сотрудники Научно-исследовательского института технологии и организации производства разработали технологию и оборудование для аргоно-дуговой сварки неплавящимся электродом жароупорной стали и легких сплавов.

Помимо НИАТа исследованиями в области дуговой сварки в защитной газовой среде занимались и занимаются Институт им. Е. О. Патона, ВНИИАвтоген, ВНИИЭСО, ЦНИИТМАШ, КБ ряда крупных заводов. Интенсивные исследования привели к бурному развитию этого вида сварки. Вместо дорогого аргона стали использовать более дешевую аргоно-гелиевую газовую смесь. Затем сварщики научились применять плавящийся электрод, что значительно расширило сферу использования дуговой сварки в защитной среде инертных газов. А вскоре в нашей стране был создан новый способ дуговой сварки с газовой защитой, а именно в струе углекислого газа. Метод предложил коллектив Института электро-сварки им. Е. О. Патона. Там же разработали и первое оборудование для сварки угольным электродом в струе CO_2 . И, наконец, крупное достижение сотрудников ЦНИИТМАШа — дуговая сварка в среде углекислого газа плавящимся электродом.

Но вернемся к аргоновой и аргоно-гелиевой дуговой сварке. При этом методе защитный газ вводится в зону дуги струей, которая проходит вдоль электрода, окружая его. Струя надежно предохраняет расплавленный металл шва от образования окислов. Преимущества этого метода: а) высокая производительность; б) высокое качество шва; в) отсутствие необходимости зачищать шов (раз нет флюса, нет и шлака); г) маневренность (в связи с малым весом сварочных

горелок-пистолетов); д) универсальность (этим способом сварки можно соединять многие металлы); е) удобство автоматизации (для сварки некоторых конструкций, особенно тонколистовых).

Советскими конструкторами созданы несколько типов автоматов и полуавтоматов для сварки в защитной среде инертного газа. Весьма производительны, например, автоматы для сварки неповоротных стыков труб различного диаметра. Эти автоматы крепятся на трубе специальным зажимом, а сварочная головка описывает вокруг трубы полный оборот, оставляя за собой прочный и ровный шов. Это движение так же, как и подача электродной проволоки, совершается автоматически.

Швы в труднодоступных местах и по сложным кривым сваривают с помощью шлангового полуавтомата. Горелка его может быть выполнена и в виде сварочного пистолета (для особо сложных швов), и в виде полуавтоматической сварочной головки, которая передвигается вдоль шва, опираясь на электродную проволоку, автоматически подающуюся в зону горения дуги.

Таким полуавтоматом можно сваривать швы стыков, имеющих любое положение и конфигурацию. При этом сварщику остается лишь наблюдение за правильностью перемещения горелки. То, что горелка опирается на электродную проволоку, дает и еще одно преимущество, а именно сохранение постоянной длины дуги независимо от изменения профиля свариваемых элементов. Шланговые полуавтоматы значительно производительнее, чем устройства для ручной сварки, портативны, и дают шов, не уступающий по качествам шву, полученному при автоматической сварке.

Советские и зарубежные предприятия выпускают и специализированные агрегаты, и универсальные установки для электродуговой сварки в защитной среде инертных газов (головки и подвесные и тракторного типа). Сварку токами более 250 а осуществляют при помощи горелок с водяным охлаждением. Специальные блок-устройства, которыми снабжены сварочные головки, в случае задержки подачи защитного газа (а также электродной проволоки или охлаждающей воды) выключают сварочный ток, что продлевает срок службы оборудования. Наконец, современные конструкции сварочных устройств допускают как замену аргона углекислым газом, так и переход вообще на сварку под флюсом (разумеется, при этом необходимо переналаживание системы).

Как бы ни был хорош метод аргоно-дуговой сварки, все же сварка в среде углекислого газа имеет по сравнению с ним ряд преимуществ, главное из которых — значительно бо-

лее низкая стоимость процесса, так как углекислый газ намного дешевле аргона. При этом сохраняется высокая производительность сварки, 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.

Какие же изделия и какие материалы свариваются с защитой зоны сварки струей углекислого газа?

Это прежде всего тонколистовые конструкции, малогабаритные детали, короткие, вертикальные и потолочные швы; сюда же надо отнести заварку дефектов литья, наплавку сложных штампов, приварку штуцеров и многое другое. Наилучшим образом метод дуговой сварки в среде углекислого газа зарекомендовал себя при изготовлении конструкций из малоуглеродистых и низколегированных сталей. Но вскоре он вышел за пределы этого круга материалов и начал осваивать высоколегированные стали и прочие металлы и сплавы. Так, известно, что за рубежом в углекислом газе сваривают детали реактивных двигателей, на которые идет весьма жаростойкая сталь, изделия из нержавеющей стали и т. д.

Материалы о разработанной ЦНИИТМАШем сварке в среде углекислого газа были опубликованы в советской технической литературе в первой половине 50-х годов. Их незамедлительно перепечатали многие зарубежные издания, и вскоре в США и Англии начали производить оборудование для этого метода сварки; их примеру последовали народные предприятия ряда социалистических стран, а также фирмы Франции, Бельгии, Швеции, Японии, ФРГ и т. д.

Столь быстрое распространение нового сварочного метода не удивительно. А. А. Чеканов приводит в своей книге «Современные методы сварки» такие данные. По опубликованным фирмой Джeneral Электрик (США) сведениям замена аргоно-дуговой сварки сваркой в защитной среде углекислого газа на одном только посту, работающем в три смены, дает за год примерно 20 тыс. долларов экономии. Триумфальному шествию сварки в CO_2 способствовали многочисленные усовершенствования, внесенные в этот метод, — например, применение кремниймарганцовистой электродной проволоки специально разработанного рецепта (марганец и кремний выполняют функции раскислителей).

Принцип дуговой сварки в защитной среде углекислого газа сводится к следующему. Специальное механическое устройство подает плавающую электродную проволоку в зону сварки. Сюда же поступает и поток углекислого газа, идущий

щего от баллона по гибкому шлангу. По пути в современных сварочных установках углекислый газ проходит через осушитель и в ряде случаев — через электрический нагревательный элемент. Расход газа фиксируется расходомером.

Аппарат для сварки может быть также снабжен системой водяного охлаждения. Однако в полуавтоматах, предназначенных для работы в условиях монтажной площадки, эта утяжеляющая аппарат система не нужна, а зимой, при морозе, даже создает дополнительные трудности. Так что системами водяного охлаждения снабжаются не все аппараты для сварки в среде углекислого газа.

Углекислый газ оттесняет воздух из зоны сварки и защищает металл от его пагубного влияния. Однако он и сам может ухудшить качество сварочного шва. Чтобы этого не случилось, применяют электродную проволоку, содержащую достаточное количество раскислителей.

Автоматические системы, осуществляющие сварку в CO_2 , иногда снабжаются и двумя сварочными головками, между которыми перемещаются свариваемые детали. Сравнительно короткие прямолинейные швы (несколько метров длиной) могут свариваться автоматами, в которых головка устанавливается на самодвижущейся тележке. Полуавтоматические и автоматические установки для сварки в CO_2 снабжаются также устройствами, которые при выключении тока сразу же прекращают подачу газа и электродной проволоки.

Способ этот помог механизировать и требующую надежного шва монтажную сварку кольцевых стыков толстостенных трубопроводов высокого давления (равноценный шов прежде можно было получить только при ручной сварке).

Новая технология и аппаратура для сварки кольцевых швов в среде углекислого газа были разработаны сотрудниками Института электросварки им. Е. О. Патона совместно с работниками треста «Южтеплоэнергомонтж». Уже на первых объектах, где применялся новый метод (трубопроводы на Криворожской ГРЭС-2 и Молдавской ГРЭС), он показал себя как очень рациональный и перспективный. Сварка осуществляется с помощью полуавтомата специальной конструкции А-1011. Процесс протекает так. Сначала к одному из стыкуемых отрезков ниточным швом приваривают подкладное кольцо. Затем после зачистки этого шва от неровностей и шлака на выступающую полосу подкладного кольца «натягивается» вторая труба. Теперь остается точно установить заданный зазор и приступить к сварке основного шва. В ряде случаев (в зависимости от материала и толщины стенок трубы) рекомендуется предварительный подогрев.

Основная трудность этой сварочной операции заключалась в том, что стык приходилось сваривать последовательно в

потолочном, вертикальном, нижнем и снова вертикальном положениях. Необходимо было менять режимы сварки. Создатели полуавтомата А-1011 справились с этой трудностью, предусмотрев такую его электросхему, которая позволяет переходить от одного режима работы к другому без остановки процесса. Обычно сварка ведется двумя аппаратами одновременно. Вертикальную часть стыка варят снизу вверх. Потолочный участок сваривается на малом режиме, шов в вертикальном и нижнем положении — на большом. Чтобы добиться высокого качества шва, его наносят слоями по 5—6 мм.

Вакуум. Пучок электронов. Лазер в роли «сварочной горелки». Как уже говорилось, задача защиты при сварке — изоляция сварочной зоны от воздействия воздуха. А что может лучше защищать от воздействия воздуха, чем... отсутствие воздуха, вакуум? Однако не все виды сварки можно осуществить в вакууме, да и сам вакуум не всегда удается создать в производственных условиях. И все же вакуум как защитная среда применяется и весьма успешно. Больше того, некоторые новые методы сварки вообще были бы невозможны, если бы не эта идеальная защита.

Начнем с диффузионной сварки в вакууме. В ряде случаев этот метод оказался чрезвычайно продуктивным, наиболее надежным и выгодным, дающим высококачественное соединение. В частности, для сварки разнородных материалов, например металлов со стеклом или с керамикой, для соединения изделий из обладающих весьма специфическими свойствами редких металлов. Способ этот, что весьма важно, позволяет также сваривать очень большие поверхности. При этом размеры свариваемых плоскостей практически не влияют на длительность процесса.

Читатель, очевидно, уже заметил, что при сварке значительно труднее получить сложный криволинейный шов, чем прямой. Если же необходимо сварить обширную поверхность сложного рельефа, трудности возрастают. При диффузионной сварке в вакууме с этим легко справляются: метод позволяет соединять детали по поверхности любой формы. Не влияет на качество сварки в вакууме и толщина изделий. Диффузионная сварка не требует применения дорогостоящей электродной проволоки и флюсов. Полученные соединения — вакуумплотные, термостойкие, вибропрочные. Стык на срезе можно найти только с помощью металлографических исследований. Не меняются свойства свариваемых материалов; так, при традиционных методах сварки магниты теряли свои свойства, а диффузионная сварка в вакууме на них не влияет.

Метод диффузионной сварки в вакууме и конструкции — сейчас их уже несколько десятков — различных СДВУ (т. е.

сварочных диффузионных вакуумных установок), как уже говорилось, созданы под руководством доктора технических наук Н. Ф. Казакова.

СДВУ могут быть оснащены системами ручного, полуавтоматического или автоматического программного управления. По уровню вакуума СДВУ делятся на системы с низким, высоким и очень высоким вакуумом. Для крупногабаритных деталей применяют СДВУ с местным вакуумом, для малогабаритных — с общим вакуумом.

Помимо обычного нагрева, применяют и другие способы интенсификации диффузии, например электрические или ультразвуковые колебания. Нагрев тоже можно получить различными методами: индукционным, контактным, электронно-лучевым, радиационным, за счет теплопроводности, тлеющим разрядом, а также комбинированными способами. По-разному в СДВУ может быть решено и механическое воздействие на соединяемые детали: как пневматическое давление; как давление вследствие термического натяга; как контактное давление от пуансона, который приводится в действие механической, пневматической или гидравлической передачами.

Мы не будем здесь останавливаться на конкретных схемах различных СДВУ и методах работы с этими аппаратами. Сведения обо всем этом читатель найдет в специальных изданиях. Отметим в заключение, что этот способ намного улучшает условия труда производственников. И перейдем к сварке электронным лучом, при котором в качестве защиты также используют вакуум.

При этом методе металл свариваемых кромок деталей расплавляет энергия быстро движущихся электронов, которыми бомбардируют места соединения. Сварка с помощью пучка электронов ведется в вакуум-камерах или камерах, наполненных инертным газом (первый метод более прогрессивный). Изделия, находящиеся в вакуумной камере, свариваются тонким и очень прочным, не требующим дополнительной обработки швом.

Однако так легко и просто получается, конечно, только на словах. Создано много установок различной конструкции для этого вида сварки, но в каждой из них, понятно, есть электронная пушка — очень сложное устройство. Прежде чем удалось получить ее надежную и производительную модель, ученым пришлось решить много проблем. Так, для фокусировки луча сотрудники Института электросварки им. Е. О. Патона разработали короткофокусную электронно-оптическую систему с электромагнитными линзами и диафрагмой. Система позволяет фокусировать луч на очень маленькой площади, получая температуру в пятне до 6000° и больше. Глубина проникновения луча может в сотни раз превышать

диаметр пятна, так что околошовная зона получается чрезвычайно узкой. Линейный шов на электроннолучевой сварочной установке можно получить, либо перемещая под лучом свариваемые детали, либо передвигая пятно луча с помощью электромагнитной отклоняющей системы.

Первые установки электроннолучевой сварки предназначались для соединения мелких элементов. Сейчас в нашей стране успешно эксплуатируются электроннолучевые аппараты для сварки крупногабаритных деталей. У них большие, толстостенные вакуумные камеры, мощные приводы для вращения и перемещения изделий, по нескольку электроннолучевых 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. Большое внимание сварщиков в нашей стране и за рубежом привлекла электроннолучевая сварочная установка У-212М, предназначенная для сварки в вакууме изделий толщиной от 0,1 до 60 мм (т. е. весьма широкого диапазона) из высокопрочных сталей, сплавов на основе титана и алюминия, из тугоплавких и химически активных металлов и других материалов. Скорость сварки на этой установке достигает 100 м/час. У-212М, разработанную совместно Институтом электросварки им. Е. О. Патона и Таганрогским заводом электротермического оборудования, начали выпускать в 1967 г. Первые отзывы — вполне благоприятные.

Электроннолучевая пушка становится все более привычным орудием на предприятиях, производящих полупроводниковые и оптические приборы. Здесь электронный луч используется и для резки, и для сварки, и для напыления пленок, и для ряда других операций. Пушки, которые применяются для микрообработки, должны обеспечить стабильный пучок электронов. А для этого необходимы также стабильные высоковольтные источники питания. Так, требуемая при микрооперациях точность обработки может быть достигнута, если отклонения ускоряющего напряжения не превышают $\pm 0,1\%$. Такие же требования и к величине пульсаций — не более $\pm 0,1\%$; при пульсациях, превышающих эту величину, нельзя гарантировать систему от «размазывания» луча.

В 1967 г. советскими учеными была создана принципиальная схема и изготовлены первые образцы стабилизированного источника питания для маломощных электроннолучевых пушек; его напряжение — 30 кВ при токе 3 мА. Не будем останавливаться подробно на схеме этого устройства (читатели могут найти ее на 77-й странице журнала «Авто-

матическая сварка» № 8 за 1967 г.). Скажем только, что его испытания показали стабильность высокого напряжения $\pm 0,1\%$ и величину пульсаций $\pm 0,05\%$.

Исследовательские и конструкторские работы в области электроннолучевой сварки ведутся весьма интенсивно. Это и не удивительно: очень уж заманчива перспектива применения этого метода для соединения материалов.

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 лазером. В этой области прогнозы специалистов самые оптимистичные. Это и понятно. Во-первых, луч лазера — чрезвычайно «тонкое» орудие, его применение сужает до минимума зону термического воздействия на материал. Во-вторых, это орудие мощное: уменьшая диаметр луча, можно довести мощность до очень больших показателей. Своим микронным «острием» луч лазера в десятитысячные доли секунды легко «прошивает» любой материал. Температура луча столь высока, что его прямому воздействию ничто не может противостоять. В-третьих, лазерный луч намного более «гибок», чем, например, пучок электронов. Он преломляется призмами или зеркалами, что позволяет сварщику добираться до любого места свариваемого изделия. В-четвертых, процесс лазерной сварки может протекать в любой пропускающей свет среде. Причем имеется возможность сваривать детали, помещенные внутрь герметически закрытого прозрачного объема, в котором создан вакуум, и добиться при этом очень высокой чистоты сварных швов.

Уникальные свойства лазерного луча позволили применить его для обработки и сварки миниатюрных деталей и сверхтвердых материалов. Значение этого трудно переоценить. Одно из направлений технического прогресса — стремление к высокой плотности схем, к высокому коэффициенту заполнения. А отсюда — к миниатюризации деталей и элементов.

Говоря о различных видах сварки, мы сознательно не останавливались на одном весьма важном вопросе — на проблеме техники безопасности и охраны труда сварщиков. Это особая тема, требующая специального рассмотрения. Однако, рассказывая о лазерной сварке, необходимо хотя бы поставить вопрос о способах защиты человека от излучения.

Вскоре после того, как был создан первый лазер, стало ясно, что при неосторожном обращении с ним даже рассеянное излучение может вызвать серьезные поражения глаз и кожного покрова сварщика. Известны случаи, когда несоблюдение правил безопасности при работе с лазером приводило к полной потере зрения.

Общее воздействие излучения лазера на биообъекты складывается из нескольких составляющих: теплового, фотохимического, механического (в частности, в форме упругих колебаний, возникающих в облучаемом объекте), электрического. Для излучения оптического квантового генератора прежде всего характерна огромная энергетическая интенсивность при кратковременности импульсного действия и большая плотность (или, иными словами, малая рассеиваемость) луча. Надо сказать, что наибольшую опасность представляют те квантовые генераторы, излучения которых лежат за пределами видимой части спектра. Это и понятно: возможность попадания таких невидимых лучей в глаза человека установить очень трудно.

Вот почему биологическое воздействие излучения лазеров и меры защиты человека от него стали объектом серьезнейших исследований в ряде научных учреждений страны, и в частности в Институте физиологии им. А. А. Богомольца АН УССР. Здесь были сделаны интересные наблюдения и открытия, положенные в основу практических рекомендаций по работе с оптическими квантовыми генераторами. В любом случае следует избегать в аппаратуре поверхностей с высоким коэффициентом отражения, особенно зеркальных. На прямой или отраженный лазерный луч нельзя смотреть без специальных защитных очков, именно специальных, ослабляющих излучение в требуемое количество раз. И уж во всяком случае нельзя попадать непосредственно под луч; для этого все пространство вдоль трассы луча должно быть в процессе работы установки недоступным для обслуживающего персонала. Наконец, сотрудники Института им. А. А. Богомольца настоятельно рекомендуют работать с лазером при ярком общем освещении.

Сварка цветных и редких металлов и сплавов

В современной технике широко используется множество различных материалов, обладающих специфическими свойствами. Весьма заметную роль среди них играют цветные и редкие металлы и сплавы. Для их соединения традиционные методы сварки в своем классическом виде иногда оказываются непригодными. В связи с этим возникла необходимость в разработке оригинальной технологии и аппаратуры для выполнения точных и надежных соединений материалов такого рода. Или специального усовершенствования технологии и аппаратуры традиционных методов сварки.

Для сварки изделий из цветных металлов, и прежде всего деталей из алюминия и его сплавов, сейчас достаточно широко применяется им-

пульсная контактная сварка. (Отметим сразу, что она вполне пригодна и для соединения элементов небольшой толщины из черных металлов). Сущность ее заключается в том, что для сварочного процесса используются короткие импульсные разряды предварительно накопленной энергии. В зависимости от способа накопления импульсная сварка может быть конденсаторной, электромагнитной и электрохимической. Остановимся на самой распространенной, конденсаторной, разработанной советскими специалистами (в частности, в Институте им. Е. О. Патона, Институте электротехники АН УССР, МВТУ им. Баумана, Киевском политехническом институте и т. д.).

Прежде всего для осуществления этого вида сварки, как видно из самого названия, необходима батарея конденсаторов большой мощности с зарядным блоком (конденсаторы для сварки, как правило, применяют высоковольтные) и устройством, обеспечивающим разряд конденсаторов на обмотку трансформатора сварочной машины. Разрядный импульс и сварочный ток регулируют изменением количества включенных конденсаторов, числа витков первичной обмотки трансформатора, и т. д. Система конденсаторов вместе с аппаратурой управления монтируется в особом корпусе отдельно от машины. Кроме того, в связи с высоким напряжением импульса, трансформатор сварочной машины имеет более мощную изоляцию и большее, чем обычно, число витков первичной обмотки. В остальном машины для конденсаторной сварки ничем принципиально не отличаются от других машин для контактной сварки. На советских предприятиях подобные аппараты применяются там, где необходимо соединить малогабаритные детали или элементы из тонкого металла. Одной из первых конденсаторных сварочных машин была специализированная машина для соединения импульсной сваркой трубчатых рам велосипедов на Харьковском велосипедном заводе. Ее применение значительно повысило производительность труда и дало весьма большую экономию. Сейчас машины для конденсаторной контактной сварки работают и на заводе малолитражных автомобилей в Москве, и на велосипедном заводе в Пензе, и на Московском электроламповом, и на Киевском весовом заводе им. Дзержинского, и на многих других предприятиях страны.

Широкое распространение этого метода, помимо прочих его достоинств, связано с возможностью добиться весьма высокого коэффициента полезного использования энергии. Известно, что чем выше сопротивление сварочного контакта, тем интенсивнее выделение теплоты в этой зоне. Сопротивление же это меняется: после кратковременного пропуска сварочного тока оно в десятки, а то и сотни раз ниже, чем сопротивление холодного контакта; затем оно снова повышается. Поэтому правильный расчет частоты и продолжительности импульсов, увеличение скорости нарастания тока во время импульса и ряд других мер позволяют добиваться повышения среднего значения сопротивления сварочного контакта. В связи с этим повышается и коэффициент использования энергии.

Весьма интересная новинка — оборудование для конденсаторной (импульсной) шовной (контактной) сварки элементов сильфонов и теплообменников. При разработке этого оборудования и соответствующей технологии ученые добивались не только обеспечения необходимых качеств соединений (высокая статическая и вибрационная прочность, достаточная герметичность при высоком вакууме или давлении, приемлемая антикоррозийная стойкость к воздействию агрессивных сред и т. д.), не только экономической эффективности, но и создания оптимальных условий труда, а именно — наибольшей безопасности и наименьшей утомляемости.

Проблема оптимальной частоты, продолжительности и мощности импульса сварочного тока решена с помощью автоматического конденсаторного дозатора энергии К-29. Дозатор может выдавать до 1200 импульсов в минуту; его зарядное напряжение — 1000 в, емкость батареи конденсаторов — 1200 мкф.

Для сварки высокопрочных коррозионноустойчивых алюминиево-магни-

вых сплавов, которые активно вытесняют сталь в судостроении, советские судостроители используют специально оснащенную машину МТИП-1000 для контактной точечной сварки. Применение этого метода вместо дорогостоящей аргоно-дуговой сварки дает значительный экономический эффект.

Первыми машину МТИП-1000 для соединения деталей и профилей из алюминийно-магниевых сплавов применили работники Ленинградского судостроительного завода им. Жданова. На МТИП-1000 свариваются пиллерсы и легкие переборки, узлы вентиляции и вентиляционные задвижки, скоб-мосты и газонепроницаемые крышки, решетки в машинокотельных помещениях и ряд других изделий.

При сварке изделий толщиной до 4 мм достаточно одного импульса. Изделия большой толщины рекомендуется сваривать с использованием дополнительного импульса, обеспечивающего замедленное остывание точки. Это позволяет избежать усадочных трещин и раковин в швах.

Для сварки изделий из алюминийных сплавов с большим сечением (до 12 тыс. мм²) Институт электросварки им. Е. О. Патона разработал серию машин контактной стыковой сварки «сопротивлением и непрерывным оплавлением». Подробно об этой разработке рассказано в статье сотрудников института, опубликованной в седьмом номере журнала «Автоматическая сварка» за 1967 г.

Выше говорилось, что контактная сварка деталей из алюминиевых сплавов вытесняет аргоно-дуговую сварку, в частности в судостроении. Однако это не значит, что электродуговая сварка для соединения изделий из алюминиевых сплавов не применяется. Так, на Балашихинском заводе им. 40-летия Октября для изготовления сосудов из алюминиевого сплава АМцС применяется аргоно-гелиевая электродуговая сварка плавящимся электродом. Наружные продольные и кольцевые швы получают с помощью сварочной головки А-1002, внутренние продольные и кольцевые — с помощью трактора А-1012, а внутренняя приварка днищ осуществляется сварочным трактором ТС-33 с выносом мундштука из базы. Конструкция сварочных горелок на всех этих аппаратах изменена так, чтобы обеспечить надежное охлаждение наконечника. Выполнение внутренних швов на медной подкладке позволяет избежать прожогов.

Правильное соотношение газов в аргоно-гелиевой смеси обеспечивает широкий и глубокий провар металла. Шов получается плотный и ровный, с хорошими механическими характеристиками, с блестящей гладкой поверхностью.

Электродуговая сварка в защитной среде инертных газов применяется и для соединения элементов из меди. Так, сотрудниками Института электросварки им. Е. О. Патона создана аппаратура и разработана технология импульсной аргоно-дуговой сварки неплавящимся электродом встык тонких медных лент. Путем экспериментов удалось выбрать такой режим, при котором вероятность появления в шве различных дефектов (пор, трещин и т. д.) минимальная и сам шов имеет отличные механические характеристики.

Значение этого метода трудно переоценить, если иметь в виду, что он создан для такой важной отрасли промышленности, как кабельная. Прежде коаксиальные кабели КБМ-4 соединялись исключительно с помощью специальных муфт, что требовало большого количества дорогостоящего серебряного припоя. Теперь с этим покончено. Изготовленный на заводе «Азовкабель» из сваренной новым методом медной ленты образец коаксиального кабеля с честью выдержал все электрические и механические испытания.

Хорошие результаты при соединении элементов из цветных и редких металлов и сплавов дает использование ультразвукового нагрева свариваемых кромок. Впервые вибрацию как источник нагрева применили в середине 30-х годов немецкие ученые при контактной сварке медных и алюминиевых шин. В 50-х годах группой американских ученых для этой

же цели были использованы колебания ультразвуковой частоты. В настоящее время метод ультразвуковой контактной сварки применяется в различных странах. В Советском Союзе весьма плодотворные исследования в данной области проводятся, в частности, в МВТУ им. Баумана под руководством доктора технических наук Г. А. Николаева.

Первоначально методом ультразвуковой сварки соединялись очень тонкие элементы, главным образом фольга из алюминия, меди и их сплавов. В настоящее время этот вид сварки применяют как для более габаритных изделий, так и для изделий из других металлов: латуни, титана, тантала, нержавеющей стали и т. д. Ультразвуковой сваркой соединяют и неметаллические материалы, в частности пластмассы.

При этом методе подлежащие соединению детали зажимаются между жесткой опорой и сваривающим наконечником, присоединенным к волноводу. Статическое усилие сжатия в зависимости от материала, габаритов и формы деталей колеблется от граммов до сотен килограммов.

Весьма важна для ультразвуковой сварки проблема подвода колебаний к соединению. Существуют две наиболее распространенные схемы: так называемая схема с боковым выступом, разработанная советскими учеными (МВТУ им. Баумана, МЭИ, Институт металлургии АН СССР), и схема с поперечным волноводом, созданная сварщиками Англии и США; работы по ее усовершенствованию также ведутся в МВТУ и МЭИ. Обе эти схемы имеют и определенные преимущества и некоторые недостатки. Так, если для первой характерны надежность, компактность конструкции, возможность использования ее для сварки изделий большой толщины и т. д., то вторую отличает 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 его масса и чем выше упругие свойства, тем меньше энергии теряется в нем.

Различными могут быть и формы волноводов; сейчас применяются ступенчатые, цилиндрические, конические, экспоненциальные, катеноидальные и другие волноводы. У каждой формы есть свои преимущества и связанная с ними сфера применения. Специфические требования предъявляются и к креплению волновода к вибратору, из которых самое важное — обеспечение надежного акустического контакта.

В настоящее время ультразвуковая контактная сварка изделий из цветных и редких металлов и сплавов — механизированный и автоматизированный процесс, осуществляемый с помощью различных машин и механизмов. В Советском Союзе разработана достаточно обширная серия сварочных машин, сварочных пистолетов и других приспособлений для ультразвуковой контактной (шовной и точечной) сварки.

В последнее время ультразвуковая сварка привлекает все большее внимание специалистов электромеханической и радиоэлектронной промышленности. Это связано с рядом особых требований, которые предъявляют в этих отраслях к соединениям материалов. В частности, здесь часто бывает жестко ограниченной максимальная температура нагрева, превышение которой может привести к недопустимому изменению параметров изделия, т. е. к браку. Кроме того, соединение материалов, применяемых в электротехнике и радиоэлектронике, должно обеспечивать надежный электрический контакт, или герметичность системы, или высокую антиударную стойкость и т. д. Материалы же, используемые здесь, могут обладать самыми различными свойствами: от высокой тугоплавкости вольфрама или молибдена, например, до легкоплавкости меди или алюминия. Ультразвуком можно сваривать и металл с керамикой, что часто бывает необходимо в электротехнике. В радиоэлектронике нынешнего дня все большее значение приобретают пленочные микросхемы, при

изготовлении которых используют ультразвуковую сварку. Незаменима она и при сварке алюминиевых проводников с напыленными золотыми пленками.

Правильный подбор основных параметров режима ультразвуковой сварки (частоты и амплитуды колебаний сварочного инструмента, контактного усилия, т. е. усилия сжатия деталей, длительности импульса ультразвука) и оптимального сварочного инструмента позволяют получить чрезвычайно прочное соединение. 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% прочности проводника. Кроме того, сварка не отражается на напыленном покрытии проволоки, что является обязательным условием создания высококачественной схемы.

Для соединения различных конструктивных элементов из цветных металлов применяют индукционную сварку. При этом методе сварки металл нагревается токами высокой частоты. С помощью индуктора создается переменное магнитное поле высокой частоты. Если внести в это поле металлические детали, в них появляются индуцированные ТВЧ, которые быстро нагревают тонкий наружный слой металла. Теперь остается сжать свариваемые поверхности, и соединение получено.

Первоначально сферой использования индукционной сварки ТВЧ было трубное производство (главным образом трубы из сплавов алюминия, никеля, меди, нержавеющей стали). Пионерами в этой области были сварщики США. Затем немецкие специалисты применили индукционную сварку для производства коленчатых валов. В Советском Союзе этими вопросами занимаются в ряде учреждений, из которых прежде всего надо упомянуть Институт электросварки им. Патона и НИИ токов высокой частоты им. Вологодина.

Первый успех коллектива киевских сварщиков — создание установки для индукционной сварки прямошовных труб диаметром до 75 мм. Затем в НИИ им. Вологодина был создан оригинальный способ сварки продольного шва труб большого диаметра. Он заключается в том, что 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 ток 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.

Говоря о сварке цветных и редких металлов и сплавов, нужно хотя бы кратко остановиться на титане, играющем столь важную роль в современной технике. Высокопрочные, стойкие к коррозии титановые сплавы сваривают в защитной аргоно-гелиевой среде методом дуговой сварки (неплавящимся вольфрамовым электродом) и методом контактной сварки. Применяется также и электродуговая сварка под флюсом (специальные флюсы для сварки титана изготавливают из смеси тугоплавких хлористых и фтористых соединений щелочных и щелочноземельных металлов методом их сплавления). Возможна и электрошлаковая сварка титана, но при этом необходимо защищать поверхность шлаковой ванны инертным газом (аргоном или гелием).

В заключение рассказа о сварке цветных и редких металлов и сплавов добавим, что для соединения данных материалов применяются и такие новые методы (о них было кратко сообщено в предыдущей главе), как диффузионная сварка в вакууме, электроннолучевая сварка и сварка лазерным лучом.

Сварка пластмасс и полимерных пленок

Нашему времени, времени невиданного технического прогресса, дано немало крылатых названий. Нынешнее столетие называют и «веком атомной энергии», и «веком покорения космоса», и «веком радиоэлектроники», и «веком кибернетики», и, наконец, «веком полимерных материалов». Безусловно, каждое из этих названий имеет право на существование, причем весьма трудно судить о том, какое из них более обосновано. Нас в данном случае интересует последнее.

Да, пластмассы стали одним из важнейших и распространеннейших материалов наших дней. Но освоение всякого нового материала неизбежно влечет за собой разработку методов соединения конструктивных элементов из этого материала. Сейчас детали из пластмасс соединяют болтами и скелками, склеивают и сваривают. Сварка пластмасс и послужит предметом дальнейшего разговора.

Примененный впервые при создании стойких к коррозии конструкций из непластифицированного поливинилхлорида, метод сварки пластмасс получил широкое распространение в связи с организацией производства различных изделий (труб, емкостей, листов и т. д.) из полиэтилена и винилпласта. Сейчас применяя различные методы сварки пластмасс, которые можно объединить в две основные группы: диффузионную и химическую.

Вторым способом соединяют главным образом отвержденные материалы (правда, при этом происходит и незначительный процесс диффузии продуктов деструкции молекулярных цепей в те места, где имеются дефекты в структуре сеток). Диффузионная сварка применяется для соединения и отвержденных и термопластичных материалов. Диффузию макромолекул термопласта в соприкасающихся соединяемых поверхностях можно инициировать двумя основными методами: подводом тепла и действием растворителя. Познакомимся теперь с теми видами соединения пластмасс, к которым в наибольшей мере подходит термин «сварка».

Сварка с применением теплоносителя включает в себя сварку нагретым газом, нагретым инструментом и нагретым присадочным материалом. Сущность первого из этих видов сварки в том, что теплоносителем является нагретый газ. Если при этом используется присадочный материал, то истекающая из наконечника нагревателя струя газа размягчает и кромки свариваемой детали и основание прутка. К прутку прикладывается 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 определяется конструкцией свариваемой детали, ее назначением и будущими нагрузками на нее. При сварке пластмасс используют различные типы швов: стыковые, торцовые, тавровые, внахлестку и т. д.

В качестве газа-теплоносителя сварщики применяют сейчас воздух (самый дешевый газ), азот, аргон, двуокись углерода (при сварке полимеров, подверженных термоокислительной деструкции), кислород (при сварке поливинилхлорида). Температура газа на выходе из сопла выбирается в зависимости от характеристик свариваемого материала. Опыт показал, что оптимальным вариантом можно считать нагрев газа на 50—100° выше температуры размягчения этого материала. Тогда потери газом тепла между соплом нагревателя и свариваемой поверхностью компенсируются «температурным запасом».

В том случае, когда хотят ускорить сварочный процесс, применяют нагреватели, оснащенные системой для предварительного подогрева при-

сачочного и основного материала. Такой скоростной способ целесообразен для сварки термопластов, расплав которых имеет склонность к термоокислительной деструкции (полиамиды, полиолефины) или обладающих низкой температурой термической деструкции (поливинилхлорид).

Еще более высокой скорости процесса позволяет добиться метод сварки нагретым газом без присадочного материала. К тому же этот метод дает и более прочное соединение. Сварка нагретым газом без присадочного материала используется главным образом для получения сварных изделий из элементов, имеющих одинаковую толщину во всех сечениях. Весьма интересна, например, сварка пленок. Особенность этого процесса в том, что струя газа не только нагревает свариваемые элементы до необходимой температуры, но и создает давление, необходимое для контакта между свариваемыми поверхностями. А чтобы она не порвала пленку, под последнюю подкладывают упругую-подложку (пористую резину и т. д.).

Сварка нагретым газом может быть и ручной и автоматической или полуавтоматической. В отечественной промышленности сейчас применяется несколько видов автоматов и полуавтоматов для сварки пластмасс нагретым газом. Это машины типа МСП-2, СПК-М, МОП-5У. Последняя из названных машин — универсальный полуавтомат для сварки пленок без присадочного материала; она позволяет сваривать швы и прямолинейные внахлестку, и Т-образные, и криволинейные.

Разработано несколько способов сварки нагретым инструментом: контактно-тепловая сварка прессованием (ее нередко называют также контактной сваркой постоянно нагретым инструментом), термоимпульсная 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 сварки пластмассовых изделий нагретым инструментом в настоящее время используются машины ПС-1, МСП-8, МСП-13, МИПТ-11, МСП-21 и т. д.

Сварка полимерных материалов в поле ТВЧ: в результате преобразования электроэнергии в теплоту непосредственно в самом материале последний нагревается до температур, необходимых для осуществления сварочного процесса. Сварка в поле ТВЧ — метод прогрессивный и экономичный. Он позволяет снизить затраты на электроэнергию и на различные накладные расходы, добиться значительной экономии за счет снижения брака. Особенно успешно применяется для сварки элементов из жесткого и пластифицированного поливинилхлорида, соединения которого при использовании контактно-теплого способа снижают прочность иногда на 60%.

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. При этом меняется и ориентация диполей. Однако соседние звенья самой молекулы и соседние молекулы препятствуют этой 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 с помощью подбора напряжения на рабочем конденсаторе и частоты электрического поля найти оптимальный вариант процесса. В частности, интенсивность нагрева можно повысить увеличением напряженности электрического поля. Однако такое увеличение возможно 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.

Для сварки пластмасс в поле ТВЧ применяются две основные схемы — прессовая и роликовая. При первом способе электроды, повторяющие внешнюю форму шва, не только подводят энергию к месту сварки, но и выполняют роль инструмента, оказывающего необходимое для сварки 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 этого вида сварки — непрерывность процесса. Но у него есть и весьма существенные недостатки. Главный из них в том, что 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.

Советская промышленность выпускает много разных автоматов и полуавтоматов для сварки пластмасс в электрическом поле ТВЧ. Так, роликовая сварка осуществляется, например, с помощью машины типа ЛТС-0,2, которая состоит из лампового генератора и собственно сварочной машины с регулируемым электроприводом. На этой же машине можно производить и точечную сварку. Для прессовой же сварки используются машины ВЧС-0,4, ЛТС-1,5, ЛГС-0,6, ЛСПС-0,6 и т. д. Эти машины — однопозиционные. Но есть и многопозиционные установки, из которых прежде всего надо назвать машины роторного типа. У многопозиционных машин, кроме рабочей позиции, есть и другие — для закрепления, подготовки и съема изделий. Благодаря этому их производительность много выше, чем у однопозиционных.

Сварка нагревом с помощью излучений. В этом разделе весьма условно объединены два метода сварки полимерных материалов: сварка нейтронным излучением (ее называют также ядерной сваркой) и сварка инфракрасным излучением.

Ядерная сварка — один из новейших способов соединения пластмасс — разработана в нашей стране. Еще в 1960 г. в печати появились сообщения об успешных опытах советских ученых по «сшиванию» тефлона и других полимерных материалов локализованным действием нейтронного излучения. Правда, до сего дня широкого распространения метод ядерной сварки пластмасс не получил. Это связано с тем, что в свариваемом материале под действием потока нейтронов возникает наведенная радиоактивность. Она сохраняется довольно долго и очень затрудняет работу с изделиями. Но некоторым элементам (фтор, кремний, алюминий) 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.

По сравнению с ядерной сваркой с помощью инфракрасного излучения можно уже считать «классической». Разработанный для соединения листов и пленок из термопластов, этот метод благодаря своей универсальности довольно быстро получил широкое распространение. Сейчас таким способом сваривают фторопласты, полиолефины, поливинилхлорид, полиэтилентерефталат, полиамиды, пентопласт. Суть сварки с помощью

инфракрасного излучения сводится к превращению внутри свариваемого материала лучистой энергии в тепловую. В связи с тем, что различные полимеры поглощают разные 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 ее увеличить и 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 лучей. Этим же объясняется высокий к.п.д. ИК нагревателя: потери энергии, связанные с непроизводительным нагревом воздуха, минимальны. Температура окружающего свариваемое изделие воздуха весьма заметно влияет на качество процесса. Замечено, что чем меньше разница температур облучаемой поверхности и воздуха, тем равномернее нагрев. Характеристики процесса при соединении пластмасс методом инфракрасного нагрева во многом зависят от выбора подложки, на которой располагаются свариваемые элементы. Подложки, как правило, черные — черная микропористая резина, черная бумага, черная прорезиненная ткань, черный пенополиуретан и т. д. Это объясняется тем, что чем выше их 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 МП-2, СПК-М, МСП-5У и др. со сменными сварочными головками. Что же представляет собой сменная головка для сварки инфракрасным излучением? 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 качалка 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.

Сварка ультразвуком и трением. О первом из этих двух методов соединения материалов мы рассказали в главе, посвященной сварке цветных и редких металлов. Так что здесь остановимся лишь на некоторых особенностях ультразвуковой сварки пластических материалов. Это один из сравнительно недавно освоенных промышленностью способов соединения полимерных материалов, но он уже глубоко разработан и обеспечен солидной материальной базой.

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 инструмент, которым оказывается необходимое давление, может повредить пленку. Если материал требует незначительного давления, применяют роликовую сварку (вращающийся ролик располагается под соединяемыми 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 она позволяет соединять полимеры без предварительной зачистки свариваемых поверхностей: масла, жиры, эмульсии, пыль удаляются из зоны сварки колебаниями материала. Больше того, ультразвуком можно сваривать и металлизированные пластмассовые изделия без всякой предварительной подготовки. Возможна даже заварка емкостей из полимерных материалов, наполненных жидкостью или сыпучим веществом: колебания не позволяют частицам этих веществ остаться в зоне шва.

Сваркой трением, впервые примененной для соединения металлических деталей, соединяют и полимерные материалы. Как известно, этот вид сварки основан на превращении в тепло механической энергии трения между контактирующими поверхностями. А поскольку пластмассы обладают очень небольшой теплопроводностью, тепло сохраняется только в зоне сварки; температура всего изделия практически не меняется. Это важно и в смысле экономичности расходования энергии, и в том плане, что нагрев не оказывает вредного влияния на изделие. Сварка трением пластмасс 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 пузырьков. В результате соединяемые поверхности термопластов в разогретом состоянии предохраняются от термоокислительной деградации.

Существует три основных вида сварки полимерных материалов трением: вращением (вращаться могут либо свариваемые детали, либо промежуточный элемент), вибротрением (за счет вибрации свариваемых деталей или промежуточного элемента), вращательно-вибрационным движением (это сложное движение также могут совершать и свариваемые детали и промежуточный элемент).

В первом случае нагрев достигается при трении вращающейся поверхности о неподвижную; промежуточный элемент применяется, когда из-за больших габаритов детали ее вращение и быстрое торможение затруднено. Вращением сейчас сваривают многие термопласты: полиэтилен, поливинилхлорид, полиметилметакрилат, полиформальдегид, полиамид, поликарбонат, полипропилен. Скорость вращения выбирается в зависимости от типа термопласта и от формы изделия. Так, для сварки трением полиэтилена и поливинилхлорида рекомендуется вращение со скоростью до 500 об/мин, а оргстекло хорошо сваривается при скорости 1000 об/мин. Надо сказать, что на качество сварочного процесса вредно влияет и чрезмерно высокая и слишком низкая скорость. В первом случае возникает весьма интенсивная деградация материала, а во втором вместо сварки происходит шлифование. Сварка трением может осуществляться с помощью различных металлообрабатывающих станков, в одних случаях — обычных токарных, в других — скоростных сверлильных. Выпускаются и сварочные машины на базе токарных станков, пригодные для сварки трением и пластмасс и металлов.

Сварка вибротрением в принципе напоминает ультразвуковую, но только свариваемым поверхностям придаются не высокочастотные, а низкочастотные колебания. Соприкасающиеся поверхности нагреваются и после прекращения вибрации свариваются. От размеров свариваемых поверхностей и толщины деталей продолжительность процесса практически не зависит. Однако 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 винипласт, органическое стекло и ряд других. В зависимости от особенностей того или иного материала выбираются различные режимы сварки. Так, при сварке вибротрением полиэтилена НП на соединяемые детали нужно оказывать давление, почти в 8 раз меньшее, чем при сварке белого полиформальдегида.

Сварка с помощью растворителей стоит несколько особо среди других видов диффузионной сварки пластических материалов. Ее и называть «сваркой» можно лишь по определенной аналогии, ибо в данном случае диффузия макромолекул полимера облегчается не нагревом, а действием растворителей. Последние способны облегчать процесс диффузии в аморфных термопластичных полимерах при обычной температуре, а некоторых кристаллизующихся полимеров — при температуре, близкой к уровню плавления кристаллической фазы. Сварка растворителем продолжается значительно дольше, чем сварка нагревом, ибо скорость диффузии в на-

бухшем поверхностном слое намного меньше, чем скорость диффузии макромолекул нагретого до текучего состояния полимера. Это связано с тем, 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. Так что сварка с помощью растворителя требует значительно большего периода выдержки изделия под давлением, чем сварка действием тепла.

Чтобы ускорить сварочный процесс и повысить прочность соединения, сварку осуществляют с применением присадочного материала, растворенного в органическом растворителе. В роли присадки обычно выступает тот же полимер, из которого сделаны соединяемые детали. Этот раствор быстрее диффундирует в пограничные слои обоих элементов изделия, чем набухший основной материал.

Сварка растворителем завоевала прочные позиции в тех технологических процессах, где необходимо соединение таких материалов, как полистирол, полиамид, поливинилхлорид, поликарбонаты, полиметилметакрилат (органическое стекло), различные сополимеры и т. д. Однако этот 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, 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. Иногда, правда, мономер свариваемого полимера при нормальной температуре пребывает в газообразном состоянии, и его в качестве растворителя нельзя использовать. Тогда берут такой мономер, который после полимеризации совмещается с растворенным в нем основным полимером.

Основные и наиболее распространенные виды сварных швов при соединении полимеров растворителем — это 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 крошки. Затем изделие некоторое время выдерживают в открытом виде, чтобы полимер хорошо набух, а избыток растворителя стек. После этого 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.

Клеи и склеивание в современном производстве

По мере развития техники возникла необходимость использования конструкционных неметаллических материалов — в машиностроении, приборостроении, авиационной, судостроительной, автомобильной и других отраслях промышленности. Одновременно эпоха очень остро поставила вопрос о разработке новых методов надежных неразъемных.

соединений из этих материалов. А развитие химии полимеров обеспечило создание новых клеев, позволивших получить весьма прочные соединения различных конструкционных материалов: металлов между собой, металла и стекла, пластмасс и др. И сейчас клееные соединения нередко предпочитают сварным, клепаным или паяным. Довольно часто применяют и комбинированные соединения: клеезаклепочные, клеесварные, клеевинтовые и клееболтовые.

В ряде машин и приборов клеевые соединения металлов с неметаллическими материалами — единственно возможные по условиям технологии. При сравнении сварных или клепочных соединений с клееными выявляется ряд преимуществ последних: а) прочность клеевого соединения несколько выше за счет отсутствия концентрации напряжений, в общем-то неизбежных, например, в сварном шве; б) как правило, уменьшение веса конструкции; в) возможность соединения очень тонких листовых деталей; г) меньшая стоимость по сравнению с другими видами соединений.

К основным недостаткам следует отнести неодинаковую устойчивость соединения к нагрузкам, приложенным в разных направлениях, а также «старение», т. е. уменьшение со временем прочности соединения.

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. Так, они выдерживают охлаждение до -60° и нагрев до $+200^{\circ}$ (а кратковременно — и до 500°); стойки к воздействию различных органических растворителей, масел, антифризов, паров и т. д.

При выборе клея для того или иного соединения 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. Для специальных соединений, таких, как клеесварные и клеезаклепочные, необходимы клеи с дополнительными показателями: повышенной текучестью, способностью хорошо заполнять зазоры и т. д.

Когда клеи и смолы служат связующими элементами или заполнителями, к ним также предъявляются специфические требования, например, одинаковый с основным материалом коэффициент температурного расширения. Помимо того, в подобных случаях клей зачастую выполняет роль диэлектрика.

Из всего многообразия клеев и смол, используемых в промышленности, авторы считают необходимым акцентировать внимание читателей на тех, которые к настоящему времени

приобрели наибольшее распространение, применяемых для склеивания сталей, титановых и алюминиевых сплавов, текстолитов и стеклотекстолитов, органического стекла, пенопластов, а также клеев и смол, используемых для заливки электротехнических и радиотехнических элементов в качестве диэлектриков-наполнителей, и др.

Понятно, что прочность соединения материалов склеиванием 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 необходимой эластичности, и к тепло- и влагостойкости, и к устойчивости против вибрации и ударных нагрузок.

Огромное значение, как уже говорилось, имеет и правильный выбор клея.

Весьма широко в последнее время применяются клеи серии БФ на основе фенольной смолы и поливинилбутираля. Клеи БФ относятся к группе терморезистивных, т. е. переходящих в нерастворимое состояние под действием дополнительных факторов (температура, давление и т. д.). Эта особенность придает клеям особую ценность, так как они становятся устойчивыми к воздействиям различных реагентов (кислоты, щелочи, растворителя) и повышенной температуры. По данным специалистов, соединения на клее БФ-2 имеют высокий предел прочности (порядка 200—220 кг/см² после длительных температурных испытаний).

Клеи БФ-2 и БФ-4 используются для склеивания металлов между собой и с неметаллическими материалами, пластмасс, стекла, эбонита, текстолита, пенопластов и других материалов. Очень важно, что БФ-2 устойчив к воздействию кислотной среды при повышенных температурах, а БФ-4 — к щелочной среде. Это дает возможность применять их при конструировании различного технологического оборудования, в котором по производственному циклу предусмотрено использование кислот и щелочей. Однако следует помнить, что жидкие клеи БФ-2 и БФ-4 обладают довольно низкой текучестью и поэтому плохо заполняют зазоры, швы и т. д. Помимо жидких клеев этих марок, есть и пленочные клеи того же наименования. Они лучше заполняют зазоры и используются для создания эластичных соединений. Вязкость клеев

БФ-2 и БФ-4 определяют по вискозиметру (обычно это вискозиметр ВЗ-1).

При выборе клеев необходимо знать их склеивающую способность. Как уже указывалось выше, склеивающая способность клеев БФ-2 и БФ-4 довольно высока — предел прочности при сдвиге склеенных поверхностей составляет примерно 200 кг/см^2 . В зависимости от типа испытаний склеенные образцы помещают в те или иные условия (термостат, камеры тепло- и холодоустойчивости, камеры с повышенной влажностью и т. д.) и определяют усилие, необходимое для разъединения склеенных образцов. Наилучшие показатели прочности имеют клеенные конструкции, работающие на «чистый» сдвиг или «чистый» отрыв. Если же клеенная конструкция работает в условиях сложных нагрузок, прочность соединения резко падает. Поэтому при выборе клея необходимо учитывать не только его свойства, но и те условия, в которых будут работать клеенные соединения.

Для расширения области применения клеенные соединения делают комбинированными. Наибольшее распространение получили соединения листовых материалов между собой, соединения листовой обшивки с элементами жесткости, склеивание панелей с заполнителем типа пенопласта, с гофрированным или с сотовым заполнителем.

Сотовый заполнитель делается из алюминиевой фольги, стеклоткани или сплавов алюминия. С применением его можно склеивать обшивки из дюралюминия, стали, титана, стеклотекстолита и других материалов. При изготовлении таких соединений используются клеи БФ-2 и БФ-4. Сотовые конструкции на основе клеев хорошо работают при низких (-60°C) и повышенных ($+60^\circ \text{C}$) температурах, выдерживают длительное воздействие воды и влажного воздуха.

Для каждой отдельной области применения указанных клеев существуют свои специфические условия, связанные с определенными технологическими и производственными факторами. Но авторы не ставили себе целью детальное рассмотрение технологических процессов склеивания различных материалов или деталей и узлов конструкций, так что тем читателям, которые в силу специфики своей работы захотят получить точные сведения об условиях склеивания вполне определенной детали или узла, мы советуем обратиться к специальной литературе.

В швейной промышленности нашел применение клей БФ-6. 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. При склеивании клеем БФ-6 образуется тонкая и весьма гибкая пленка,

достаточно прочно соединяющая ткань и в то же время почти не влияющая на эластичность изделия. Клей БФ-6 применяется, помимо этого, для склеивания резины и резины и ткани с металлом.

Склеивание составами БФ-2 и БФ-4 ведется при повышенной температуре ($150\text{--}250^\circ\text{C}$). Это объясняется тем, что названные клеи при обычных условиях находятся в жидком состоянии и содержат довольно большое количество растворителя. Понятно, что при склеивании, т. е. при переводе этого клея в твердое состояние, необходимо создать условия для постепенного испарения растворителя. В связи с этим склеивание проводят в несколько приемов. Сначала на подготовленную поверхность наносится тонкий слой жидкого клея, который подсушивается в течение 30 мин при температуре $20\text{--}30^\circ\text{C}$ и 15—20 мин при температуре $+50^\circ\text{C}$. Таких слоев может быть нанесено несколько — в зависимости от требований к толщине слоя клея.

Затем осуществляется дополнительная сушка при температуре $80\text{--}95^\circ\text{C}$, которая продолжается 20 мин. Такое ступенчатое повышение температуры и подсушка отдельных слоев обеспечивает хорошее удаление растворителя и отсутствие пористости в клеевом слое. В результате клеи находятся в отвержденном состоянии и при стыковке склеиваемых поверхностей для осуществления собственно склеивания необходим подогрев. В этой связи очень важно помнить, что прочность во многом зависит от чистоты склеиваемых поверхностей.

При подогреве пленка нанесенного клея только размягчается, не приобретая значительной текучести, и не заполняет достаточно хорошо все неровности, оставшиеся после обработки поверхности. Поэтому, как правило, при склеивании этими клеями, помимо подогрева, применяется давление, прессование.

Правильно выбранный режим подогрева при склеивании (максимальная температура, скорость нагрева, время выдержки, охлаждение и т. д.) также влияет на прочность соединения. В связи с этим важно выбрать оптимальный для тех или иных материалов метод нагрева. Так, при склеивании металлов рекомендуется индукционный метод, обеспечивающий быстрый нагрев до требуемой температуры. В книге «Технология склеивания металлов» один из ее авторов приводит такие данные. Для клеев БФ-2 и БФ-4 наилучшими режимами склеивания можно считать: температура склеивания— 180°C , время нагрева 2 мин, удельное давление 10 кг/см^2 , выдержка 10 мин (или: температура склеивания— 200°C , время нагрева 2 мин, удельное давление 10 кг/см^2 , выдержка 2 мин).

Там, где нельзя применить индукционный нагрев (склеива-

ние неметаллических материалов), используют конвекционный. В этих случаях нагрев осуществляется электронагревателями различных типов — лентами или спиралями из никрома, вольфрама и других материалов с большим сопротивлением или же стандартными тепловыми элементами ТЭНами.

Для обеспечения необходимого давления склеиваемые детали помещают в различного рода гидравлические или пневматические прессы и т. д. В случае необходимости склеивания при повышенной температуре и под давлением широко применяются прессформы с подогревом. Однако встречаются случаи, когда конфигурация или материал склеиваемых деталей не позволяет использовать прессование. Тогда применяют клеи, отверждающиеся без прессования. Правда, при этом иногда приходится несколько поступиться требованиями к прочности соединения.

Еще одна группа клеев, нашедшая широкое применение в промышленности и поэтому заслуживающая особого внимания, — это фенольно-каучуковые клеи ВК-3, ВК-4, ВК-32-200 и ВК-32-250 — теплостойкие, выдерживающие кратковременное повышение температуры до $+350^{\circ}\text{C}$. Теплостойкость этих клеев определяет и процесс склеивания, он должен проводиться с подогревом до $200\text{—}250^{\circ}\text{C}$.

Фенольно-каучуковые клеи используют для склеивания металлов и неметаллических конструкционных материалов. При склеивании этими клеями конструкций из алюминия или стеклотекстолита применяются обычно сотовые заполнители. С использованием же сотового заполнителя из алюминиевой фольги этими клеями можно соединять даже обшивки из титана, дюралюминия, стали.

Клеи ВК-3, ВК-4, ВК-32-200 и ВК-32-250 (так же, как клеи БФ-2 и БФ-4) выпускаются в жидком состоянии или в виде пленки; жидкие клеи имеют довольно густую консистенцию и окрашены в темный цвет. Перед использованием пленочных клеев на склеиваемые детали наносится подсло́й жидкого клея. При склеивании фенольно-каучуковыми клеями нанесение клея осуществляется в несколько приемов: сначала наносится первый слой, который подсушивается при температуре $20\text{—}30^{\circ}\text{C}$ в течение получаса, затем наносится второй слой и опять подсушивается при температуре порядка $+30^{\circ}\text{C}$ (при укладке на первый слой пленки они выдерживаются при температуре $60\text{—}65^{\circ}\text{C}$ в течение примерно полутора часов); наконец, прессование с удельным давлением $6\text{—}10\text{ кг/см}^2$ при температуре $160\text{—}190^{\circ}\text{C}$ и с выдержкой в течение 2 ч. Описываемые клеи при нагреве не приобретают достаточную текучесть, поэтому при незначительном давлении (до 4 кг/см^2) появляются непроклеенные участки. В случае склеивания пленочным клеем давление может быть по-

рядка 6 кг/см^2 , но при этом необходима тщательная подгонка склеиваемых поверхностей. Применение же давления свыше 10 кг/см^2 нецелесообразно, так как прочность склеиваемого соединения при этом практически не увеличивается. Поскольку указанные клеи имеют сравнительно большую вязкость, толщина слоя клея с увеличением давления уменьшается незначительно и при давлении в 10 кг/см^2 составляет $0,10\text{—}0,12 \text{ мм}$.

Однако толщина клеевой прослойки зависит не только от давления, приложенного к склеиваемым деталям, но и от площади последних. С увеличением ширины склеиваемых площадок возможны утолщения клеевой прослойки из-за неравномерного распределения давления и, как следствие этого, образование мест с непроклеенной поверхностью. А это, в свою очередь, влечет за собой резкое снижение прочности соединения. Для предотвращения подобных явлений необходимо тщательно подгонять склеиваемые поверхности и создавать условия, при которых было бы заведомо обеспечено равномерное давление на склеиваемые детали. Эти условия особенно трудно выполнить, когда склеиваются детали сложных конфигураций или материал склеиваемых деталей исключает возможность склеивания под давлением (алюминиевая или магниевая фольга и т. д.). В таких случаях давление снижают до минимально допустимого (в случаях склеивания обшивок с применением сотового заполнителя из фольги давление составляет $0,3\text{—}0,5 \text{ кг/см}^2$) или используют клеи, застывание которых происходит без давления при комнатной или повышенной температуре (отверждение подобных клеев — результат химической реакции и происходит достаточно хорошо при нормальной температуре).

Но чаще всего склеивание клеями ВК-3, ВК-4, ВК-32-200 и ВК-32-250 осуществляется под давлением и с применением подогрева. Для обеспечения необходимого давления применяют различные гидравлические и пневматические прессы, автоклавы, винтовые зажимы и т. д. Разнообразны и методы подогрева: с использованием теплоносителей (пар и горячая вода); с использованием элементов сопротивлений из никрома или нержавеющей стали и ТЭНов; индукционный и диэлектрический.

Выбор способа воздействия зависит от характера производства — крупносерийного, мелкосерийного или лабораторно-опытного.

Так, в серийном и массовом производстве применяются высокопроизводительные прессовые установки с наиболее совершенными методами подогрева — индукционным и диэлектрическим. Для контроля и регулирования давления и температуры они оснащаются различными приборами (манометрами, вакуумметрами, термopарами с потенциометрами,

приборами, регистрирующими и задающими необходимую температуру, и т. д.).

При склеивании детали собирают в конструкцию и фиксируют прижимами или помещают в прессформу, под пресс или в автоклав. На гидравлических и пневматических прессах обычно прессуются плоские листовые изделия, а в автоклавы помещаются изделия сложной конфигурации.

Большое распространение у нас и за рубежом нашли прессы с использованием гидравлики или сжатого воздуха. После установки изделия под пресс включается гидравлическая или пневматическая система и по приборам устанавливают необходимое давление. Включают подогрев, и изделие выдерживается при этих условиях столько времени, сколько этого требует технология. Затем подогрев выключают, и изделие охлаждается без снятия давления (охлаждение может быть естественное или искусственное). После того как изделие остыло до комнатной температуры ($+20^{\circ}\text{C}$), давление снимается и деталь готова.

Для прессования в автоклавах обычно применяют комбинацию вакуума и давления, так как с помощью одного только вакуума трудно достичь необходимого воздействия на склеиваемую деталь. Изделия, зафиксированные в нужном положении прижимами, накрывают диафрагмой и помещают в автоклав. Вакуумным насосом из-под диафрагмы откачивают воздух, внутрь автоклава (при необходимости увеличить давление) подают сжатый воздух. Для подогрева изделия в автоклаве обычно имеется змеевик, в который подается пар. Этот же змеевик используется и для охлаждения (после прекращения подачи пара в него поступает холодная вода).

В тех случаях, когда отверждение клея происходит без приложения давления, но с подогревом, широко применяются терморadiационные печи с электрическими нагревательными элементами (особенно для склеивания крупногабаритных изделий). Могут быть использованы также инфракрасные лампы, контактные нагреватели и т. д., если на крупногабаритном изделии необходим местный нагрев или оно не может быть помещено в печь из-за больших размеров.

При серийном выпуске небольших деталей процесс склеивания осуществляют на конвейере. Здесь для температурного отверждения используют широко распространенные в СССР и за рубежом инфракрасные лампы. Конвейер с заданной скоростью, обеспечивающей полное время сушки, проходит по каналу, в котором установлены лампы. По выходе из канала процесс закончен.

При определении методов отверждения необходимо с самого начала учитывать возможности использования того или иного метода подогрева или способа приложения давления.

Это в равной степени касается и самого клея, и формы изделия, и материала склеиваемых образцов. Так, например, при склеивании металла с каким-либо неметаллическим материалом, помимо уже указанных условий, необходимо учитывать различные коэффициенты температурных расширений этих материалов и в зависимости от этого выбирать соответствующий метод склеивания. Естественно, что при склеивании металла и пластмассы, имеющих разные коэффициенты расширения, полный подогрев неуместен, так как после остывания либо клеевая прослойка будет нарушена, либо изделие сильно деформировано. А возможно — и то и другое вместе. В этих случаях процесс отверждения проводят при невысокой температуре под давлением или без него. И время для полного отверждения, как правило, требуется значительно большее.

Если же склеивание различных материалов проводится при повышенной температуре (одинаковые коэффициенты расширения), но материалы имеют различную массу, поперечное сечение и т. д., нельзя допускать резкого охлаждения, так как детали с меньшим сечением (тонкие листы и др.) остывают значительно быстрее и конструкция может оказаться покособленной.

Все это еще раз подтверждает необходимость всестороннего рассмотрения условий склеивания. Особенно тщательно и осторожно к подбору клея и определению технологии склеивания нужно подходить конструкторам. Нередко случается, что при составлении проекта в конструкции машины предусматриваются клеевые соединения. А потом оказывается, что в производственных условиях осуществить их без снижения надежности изделия практически невозможно...

Помимо уже перечисленных, отечественная и зарубежная промышленность сейчас успешно использует полиуретановые клеи на основе полиэфира (в Советском Союзе это ПУ-2 и ВК-5). При их использовании не требуется подогрева, так как наполнители и катализаторы обеспечивают быструю химическую реакцию, в результате которой застывает клеевой слой. Эти клеи не относятся к теплостойким и длительное время могут выдерживать лишь температуру, не превышающую 60—80° С. Благодаря тому, что в обычном состоянии клеи ПУ-2 и ВК-5 обладают свойствами текучести, они хорошо заполняют зазоры.

Клей ПУ-2 может готовиться как с наполнителем (например, с цементом), так и без него. Без наполнителя клей белого цвета, а с наполнителем — светло-серого; в последнем случае он имеет пастообразную консистенцию.

Клей ВК-5 — прозрачная желтоватая жидкость.

Клей ПУ-2 применяют для склеивания самых разнообраз-

ных металлов и неметаллических материалов. При этом получают достаточно прочное соединение (предел прочности на сдвиг составляет 180—250 кг/см²). Для обеспечения более высокой прочности соединения и для ускорения процесса склеивания применяют подогрев до температуры 100—110° С.

В отличие от ранее описанных клеев БФ-2 и БФ-4 клеи ПУ-2 и ВК-5 готовят на месте производства из отдельных компонентов, в строгой пропорции. После приготовления клея максимальный срок хранения его до употребления не более 2 ч.

К неприятным особенностям указанных клеев относится выделение ими токсических веществ. Поэтому при их приготовлении и использовании совершенно обязательно наличие вытяжных шкафов, приточно-вытяжной вентиляции, местных отсосов и т. д.

Сам процесс склеивания этими клеями не многим отличается от ранее описанных. Склеивание может вестись при комнатной и повышенной (110° С) температурах. Так как эти клеи хорошо текучи, то при склеивании под давлением усилие, прикладываемое к соединяемым деталям, не должно быть большим (обычно применяют удельное давление в пределах от 0,5 до 5 кг/см²). При этом давлении и при достаточно хорошо подогнанных поверхностях слой получается равномерным по толщине. Дальнейшее же увеличение давления может привести к выдавливанию клея, к слишком сильному утоньшению клеевой прослойки, что отрицательно сказывается на прочности соединения.

При склеивании клеем ПУ-2 при температуре 110° С необходима выдержка около 3 ч. В случае прессования без нагрева эта выдержка составляет 30—40 ч и еще до 40—48 ч после снятия давления. При склеивании под давлением и с подогревом до температуры порядка 60° С выдержка под давлением меньше — 16—20 ч (для клея ВК-5 — 8—10 ч).

Для прессования и подогрева при склеивании клеями ПУ-2 и ВК-5 применяется оборудование, описанное выше: прижимы, автоклавы, прессы и пр.

Следующая весьма характерная группа клеев и компаундов, применяющаяся в промышленности для соединения различных материалов, заливки блоков и узлов электротехнического и электронного оборудования, пропитки изделий электротехнической промышленности и т. д., включает составы на основе эпоксидных смол (это смолы ЭД-5, ЭД-6, ЭД-15, ЭДФ-3, ЭДЛ-100 и др.). Данная группа весьма обширна по номенклатуре применяющихся клеев (их насчитывается несколько десятков).

Отличительные особенности этих клеев — наличие в составе различных отвердителей и наполнителей, а также возмож-

ность модификаций самих эпоксидных смол, на основе которых созданы клеи. В зависимости от состава эпоксидные клеи могут быть условно разделены на две подгруппы: отверждающиеся без подогрева и работающие удовлетворительно в интервале температур $\pm 60^\circ\text{C}$ (К-153, КЛН-1, Л-4 и др.); отверждающиеся с подогревом и работающие удовлетворительно в интервалах температур от -60 до $+250^\circ\text{C}$ (ВК-7, ВК-32ЭМ, эпоксид II и др.).

Для склеивания неметаллических материалов чаще применяется клей КЛН-1, а при необходимости получить соединение с хорошими диэлектрическими свойствами — К-135. Этот клей хорошо зарекомендовал себя при соединении стеклотекстолитов и стеклопластиков между собой и с металлами.

Весьма хорошие результаты при использовании эпоксидных клеев получаются в трехслойных конструкциях с промежуточным слоем из различных пенопластов и сотового заполнителя. Очень важен правильный выбор рецептуры клея. Он во многом зависит от того количества практических данных, которыми располагают технологи и конструкторы.

Так как условия эксплуатации клеевых соединений могут быть самыми разнообразными, то и рецептура клея должна быть достаточно обширной. Разнообразие рецептуры эпоксидных клеев объясняется использованием большого количества различных отвердителей, наполнителей и пластификаторов. Наличие в составе клея тех или иных наполнителей или отвердителей определяет прочность склеивания, от этого в значительной степени зависит выбор технологической операции и режима склеивания. В качестве наполнителя применяются кварцевая мука, алюминиевый или железный порошок, фарфоровая мука, графит и др. Наполнители увеличивают прочность клеевого соединения в среднем на 50—60%. Отвердителем чаще всего служит полиэтиленполиамин — для клеев холодного отверждения и триэтаноламин — для клеев горячего отверждения. Наконец, одна из основных пластифицирующих добавок — дибутилфталат.

Диапазон использования эпоксидных клеев настолько широк, что трудно даже перечислить все области их применения. Клеи пришли в строительство. Склеиванием облицовочного стекла с промежуточным слоем из алюминиевых сот получают непрозрачные перегородки, используемые при возведении административных зданий. Так же делаются потолочные окна. Большое распространение нашли отделочные и звукоизолирующие перегородки, склеенные в три слоя с промежуточным слоем из различных армированных пенопластов и пеноэпоксидов. Такие же конструкции широко применяются в

кораблестроении, самолетостроении, при изготовлении вагонов, рефрижераторов и т. д.

В электротехнической и электронной промышленности эпоксидные клеи применяются и как связующие, и как диэлектрики для склеивания роторных и статорных пластин электрических двигателей, сердечников катушек, металлических и пластмассовых деталей в электроаппаратуре, для герметизации электронных элементов и т. д.

В последнее время эпоксидные клеи все чаще используются для заделки дефектов литья, различных трещин и раковин. Они с успехом применяются при ремонте поршней автомобилей и тракторов, судов и других транспортных средств. Их начали применять и для защиты металла от коррозии.

Особая область применения эпоксидных компаундов — их использование в качестве заливочных, герметизирующих и изолирующих материалов. «Служба» эпоксидных компаундов в этой «должности» стала возможной в силу их хорошей склеивающей связи со многими материалами, а также благодаря высоким диэлектрическим свойствам. Эпоксидные компаунды широко применяются в электротехнической промышленности для заливки и пропитки самых разнообразных изделий. Это в первую очередь относится к катушкам трансформаторов (силовых, накальных, импульсных), дросселей и т. д. И если в силовых трехфазных трансформаторах напряжением до 10 кв заливаются и пропитываются только катушки, то импульсные и отчасти накальные трансформаторы заливаются целиком (для этого их помещают в соответствующую форму). В итоге получается полностью герметизированная деталь, имеющая проволочные выводы для распайки в схему.

Эпоксидные компаунды все чаще заменяют фарфор и керамику при производстве низковольтных и высоковольтных проходных изоляторов. В радиотехнической и электронной промышленности они с успехом используются как средство герметизации отдельных приборов и элементов, а также для создания блоков из нескольких элементов. В настоящее время довольно широко применяются блоки из сопротивлений и полупроводников, а также смешанные, в которых имеются еще и конденсаторы и другие элементы. Создание таких блоков дало возможность значительно уменьшить размеры схем, так как литая изоляция обеспечила лучшие диэлектрические свойства по сравнению с открытым монтажом.

При создании подобных блоков пользуются различными методами. Одни из них предусматривают монтаж элементов (сопротивлений типа МЛТ или диодов Д7 и Д226) на панели из стеклотекстолита с последующей заливкой. Другие, более совершенные, — на сепараторе, который затем помещает-

ся в форму и заливается. После отверждения компаунда и извлечения блока из формы он приобретает законченный вид и не требует, как правило, дополнительной внешней обработки.

При работе с эпоксидными клеями и компаундами особое место занимают вопросы техники безопасности. Дело в том, что большинство модификаций эпоксидных компаундов и особенно отвердители весьма токсичны. Они раздражают слизистые оболочки дыхательных путей и глаз, могут вызывать заболевания кожи. При длительной работе в присутствии паров или пыли отвердителей поражения могут быть довольно тяжелыми. Для предотвращения вредного воздействия эпоксидных клеев и компаундов, работы с ними проводятся с соблюдением особых мер (наличие хорошей приточно-вытяжной вентиляции, использование специальных камер для подогрева и смешивания смолы и отвердителей и т. д.). В то же время в нашей стране и за рубежом продолжают изыскания, направленные на дальнейшее повышение безопасности самих условий работы. Наиболее важны следующие направления: а) замена токсичных отвердителей нетоксичными; б) создание средств механизации, исключающих непосредственный контакт с токсичными веществами. В каждом из этих направлений к настоящему времени достигнуты значительные результаты.

Для более полного ознакомления с возможностями, которые открывает использование клея в промышленном производстве, необходимо хотя бы вкратце остановиться на некоторых областях применения его за рубежом.

Зарубежными фирмами разработано много клеев и компаундов для соединения металлов и неметаллических конструктивных материалов. Для склеивания алюминия и его сплавов с различными металлами, древесиной, резиной и другими материалами широко используется клей английского производства марки «Ридакс». Он создан на основе фенольной смолы с добавлением различных связующих. Клеи этой марки дают довольно высокую прочность соединения (340 кг/см^2 при испытании на сдвиг), и хотя они относятся к группе клеев горячего отверждения, верхняя граница интервала их рабочих температур находится в пределах 100°C .

Вторая группа клеев горячего отверждения—типа «Аральдит» — применяется в основном для склеивания металлов. Эти клеи (на основе эпоксидной смолы) дают возможность получить соединения с пределом прочности на сдвиг до $250—350 \text{ кг/см}^2$; максимальная рабочая температура клеевого соединения $+120^\circ \text{C}$.

Потребность промышленности (особенно авиационной) явилась стимулом создания группы теплостойких клеев.

В первую очередь следует отметить клей, разработанный учеными США на основе фенолальдегидной смолы. Прочность соединения несколько ниже, чем у клея «Ридакс», но зато рабочая температура находится в пределах $+315^{\circ}\text{C}$. Этот клей используется для склеивания металлов, пластиков и других материалов. По сведениям американской печати, даже ракеты включают в себя узлы, склеенные с его помощью. Модификация этого клея, известная под маркой СНТ, нашла широкое применение при создании обшивок из металла или теплоустойчивых пластиков в трехслойной конструкции.

К теплостойким клеям относятся также клей FPL-710 с максимальной рабочей температурой $+300^{\circ}\text{C}$ и клей 422 (рассчитанный на температуру до $+260^{\circ}\text{C}$). При этих температурах соединение сохраняет предел прочности порядка $90\text{—}98\text{ кг/см}^2$. Клеи 422 и FPL-710 выпускаются (после модификации) в виде пленки, основа которой — стеклоткань.

Для склеивания специальных изделий, подверженных, помимо температурных, изгибающим и ударным воздействиям, английские химики разработали клей «Метлбонд-4021». Он состоит из двух частей: жидкой грунтовки, которую наносят на поверхность, и клеевой пленки (ее накладывают на загрунтованную поверхность). Клей отверждается при температуре $+170^{\circ}\text{C}$ и давлении 7 кг/см^2 в течение часа.

Перечисленные клеи широко используются в самолетостроении. По данным зарубежной печати, клей «Ридакс» применяется при создании реактивных самолетов «Комета»: им приклеиваются стрингеры к фюзеляжным панелям, оконные рамы к стенкам фюзеляжа и т. д. Соединения на клею есть и в голландском самолете «Фоккер», и во французском реактивном самолете «Вотур», и в американских «Боингах». Особую роль клеи сыграли при создании лопастей винтов вертолетов. И если вначале применялись комбинированные соединения, то в последнее время некоторые западноевропейские и американские фирмы изготавливают полностью склеенные металлические лопасти.

Высокие требования современной техники к прочности (особенно при соединении тонких листовых материалов) и герметичности вызвали к жизни клеесварные, клееболтовые, клеезаклепочные и клеевинтовые способы соединения. Поскольку в предыдущих главах речь шла о сварке, здесь в качестве примера такого комбинированного метода мы остановимся на клеесварных соединениях.

В комбинации со склеиванием лучше всего, пожалуй, себя зарекомендовала точечная сварка. При этом могут быть использованы несколько вариантов: 1) точечная импульсная сварка проводится после нанесения жидкого клея на всю поверхность соединения; 2) клей в виде пленки с проделан-

ными в ней отверстиями укладывается на плоскости швов, а затем ведется сварка — в тех местах, где есть отверстия; 3) сначала — сварка, а затем зазоры заливаются клеем.

При сварке изделий по сплошному слою необходимо, чтобы клей был не слишком густым и легко выдавливался под давлением соответствующих элементов сварочной системы. С другой стороны, импульс сварочного тока должен быть достаточно сильным, чтобы проварить стык, где имеется слой клея (как правило, диэлектрика).

При этом методе сварки важно подобрать клей и режимы сварки так, чтобы сохранить цельность клеевого слоя и исключить возможность возникновения пористой прослойки. Для выполнения соединений описанным методом применяется клей ВК-32ЭМ, позволяющий производить сварку по клею по прошествии значительного времени. Другие клеи (например, ПУ-2) через 25—30 мин становятся очень вязкими и не выдавливаются в той степени, какой требует технология. Этот способ нашел широкое применение при изготовлении панелей из тонколистового материала с ребрами жесткости, при соединении листового материала в многослойную конструкцию и т. д.

Методы нанесения клея и режимы склеивания в этом случае такие же, как и при обычном склеивании. После сварки изделие помещают в нагревательные камеры, где выдерживают до отверждения клея при температуре $+150^{\circ}\text{C}$. Затем при необходимости изделие может подвергаться дополнительной обработке — хромированию, никелированию, анодированию.

Способом сварки через отверстия в клеевой пленке соединяют детали, имеющие незначительную площадь соединения. По большей части это узкие полосы. При этом методе из пленочного клея прежде всего вырезается полоска по ширине соединения. В ней с помощью трафарета пробивают отверстия, несколько большие площади контакта электродов. Затем пленка укладывается на поверхность соединения и закрепляется с помощью жидкого подслоя клея или фиксаторами. Сверху накладывается вторая соединяемая деталь. После этого опять же по трафарету производится сварка.

Этот метод не свободен от недостатков. Он трудоемок и, как показала практика, не всегда дает достаточно герметичное соединение. Для получения герметичных соединений при использовании пленочных клеев в шов необходимо дополнительно заливать жидкий клей. Отверждение клея проводится по режимам, описанным ранее для соединений на пленочных клеях.

Основной пленочный клей, используемый для клеесварных соединений, — ВК-32-200.

Третий метод (с заливкой зазоров после сварки) технологически сравнительно прост; он применяется в тех случаях, когда главное не упрочнение конструкции с помощью клея, а получение герметичных швов (с последующей гальванической обработкой изделий). При этом методе соединения используют широкий ассортимент жидких клеев; соответственно каждому клею выбираются и режимы отверждения.

Необходимо хотя бы вкратце остановиться на методах нанесения клеев и компаундов на соединяемые поверхности.

Для нанесения тонких слоев жидкого клея на детали значительной площади применяют пульверизаторы. На узкие поверхности и в труднодоступные места жидкий клей накладывают шприцами различной конструкции. Более густые и пастообразные клеи наносят кистями, шпателями, различными роликами. Что же касается сотовых и других подобных заполнителей, то их просто «окунают» в жидкий клей. Пленочные клеи, как уже говорилось, чаще всего накладываются на подслой жидкого клея, а затем прижимаются роликом: при этом может использоваться нагрев.

Сейчас клеи и в отечественном производстве и за рубежом наносятся ручным способом. Очень сложны, подчас, конструктивные особенности соединяемых деталей. Следует учесть и технические трудности работы с самим клеем. Однако исследования, которые в настоящее время проводятся в этой области дают основание надеяться, что проблема механизации процесса нанесения клея будет решена в промышленных масштабах.

Заключение

Итак, мы завершили краткий обзор методов соединения материалов в современной технике. Обзор, конечно, далеко не полный. Из-за недостатка места не удалось рассказать, например, о клепке и пайке, о некоторых методах сварки, о многих имеющих промышленное значение клеях, о ряде комбинированных методов, объединяющих преимущества сварки или клепки, с одной стороны, и склеивания с другой. Но обо всем в небольшой брошюре не расскажешь. Нужна обширная популярно написанная энциклопедия на эту тему. Однако такой труд, понятно, по силам только большому коллективу авторов. И все же, думается, данное издание выпол-

нит свою главную задачу: еще раз обратит внимание производителей на то, что уже сегодня существует огромный комплекс методов соединения материалов, из которых можно выбрать наиболее подходящий способ для решения практически любой производственной задачи.

Как бы ни были сегодня велики достижения ученых-специалистов по соединению материалов, завтра мы узнаем о новых, еще более грандиозных открытиях. Среди ученых, занятых изучением мирового океана, бытует такая пословица: «Какую бы крупную рыбу ни выловили, поимка самой большой — впереди». Так, собственно, можно сказать о любой отрасли науки. Самое крупное открытие — всегда впереди.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
От электрической дуги до лазерного луча	5
Сварка цветных и редких металлов и сплавов	36
Сварка пластмасс и полимерных пленок	41
Клеи и склеивание в современном производстве	46
Заключение	61

КРАСНОВСКИЙ Александр Абрамович
ФЕДОРОВ Ричард Федорович

СОЕДИНЕНИЕ МАТЕРИАЛОВ

Редактор **Г. И. Флиорент**
Худож. редактор **Е. Е. Соколов**
Техн. редактор **Л. А. Дороднова**
Корректор **Г. В. Жендарева**
Обложка **Б. В. Макарова**

А 02336. Сдано в набор 27/III 1968 г. Подписано к печати 10/VI 1968 г.
Формат бумаги 60×90/16. Бумага типографская № 3. Бум. л. 2,0.
Печ. л. 4,0. Уч.-изд. л. 4,03. Тираж 11 400 экз. Издательство «Знание».
Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4. Заказ 1071. Типография изд-ва
«Знание». Москва, Центр, Новая пл., д. 3/4.
Цена 12 коп.

ТЕМ, КОГО ИНТЕРЕСУЕТ ФИЗИКА И АСТРОНОМИЯ

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ» ПРЕДЛАГАЕТ СЕРИЮ НАУЧНО-ПОПУЛЯРНЫХ БРОШЮР

«ФИЗИКА, АСТРОНОМИЯ»

Эти книжки в популярной форме познакомят вас с новейшими успехами ядерной физики, достижениями в области физики твердого тела, астрофизики, космологии.

ГИНЗБУРГ В. Л., акад. *КАК УСТРОЕНА ВСЕЛЕННАЯ И КАК ОНА ИЗМЕНЯЕТСЯ ВО ВРЕМЕНИ.*

СЕДОВ Л. И., акад. *НАУКА, КОСМОНАВТИКА И ОБЩЕСТВО.*

ЩЕЛКИН К. И., член-корр. АН СССР. *ДЕТОНАЦИЯ.*

ФРИШ С. Э., член-корр. АН СССР. *СОВРЕМЕННАЯ ОПТИКА.*

ГУРЕВИЧ Л. Э., профессор. *ТЕОРИЯ ОТНОСИТЕЛЬНОСТИ В КАРТИНЕ МИРА.*

Вот те работы, которые получают подписчики серии «Физика, астрономия» во втором полугодии 1968 года.

Всего в год выходит 12 брошюр.

Подписка на эту серию производится как на газеты или журналы в любом отделении «Союзпечати».

В каталоге вы найдете серию «Физика, астрономия» в разделе «Научно-популярные журналы» под рубрикой «Брошюры издательства «Знание».

Стоимость подписки на квартал — 27 коп.

ПОДПИСЫВАЙТЕСЬ НА СЕРИЮ «ФИЗИКА, АСТРОНОМИЯ»!

ИЗДАТЕЛЬСТВО «ЗНАНИЕ»