

Б.Е. Патон
А.Н. Корниенко

ученые
ДЭ
школьники

Огонь сшивает металл





БОРИС ЕВГЕНЬЕВИЧ ПАТОН — советский ученый, крупнейший специалист в области металлургии и сварки, академик АН СССР, дважды Герой Социалистического Труда. Родился в 1918 г., окончил Киевский индустриальный институт, работает в Институте электросварки им. Е. О. Патона АН УССР; с 1953 г. он директор этого института, с 1962 г. — президент АН УССР. Б. Е. Патон заложил научные основы конструирования сварочных источников питания и аппаратов для дуговой механизированной сварки. Под его руководством создан и внедрен в практику принципиально новый, электрошлаковый способ сварки и т. д.

Б. Е. Патон руководит также работами в области специальной электрометаллургии. Он автор нескольких книг, сотен научных и научно-популярных статей и изобретений.



Б. Е. Патон — член ЦК КПСС и ЦК Компартии Украины, депутат Верховных Советов СССР и УССР, заместитель председателя Совета Союза Верховного Совета СССР, председатель Координационного совета по сварке. Награжден орденами и медалями, лауреат Ленинской и Государственной премий.

АЛЕКСАНДР НИКОЛАЕВИЧ КОРНИЕНКО — кандидат технических наук, старший научный сотрудник Института электросварки им. Е. О. Патона. Родился в 1938 г., окончил Киевский политехнический институт. Занимается в основном новыми методами сварки металлов, автор 50 изобретений. За разработку и внедрение плазменной сварки цветных металлов награжден серебряной медалью ВДНХ СССР.

Б. Е. Патон
А. Н. Корниенко

Библиотечка
Детской
энциклопедии



Огонь сшивает металл

Редакционная
коллегия:
И. В. Петрянов
(главный редактор),
И. Л. Кнунянц,
А. Л. Нарочницкий



Москва
«Педагогика», 1980



Scan AAW

Патон Б. Е., Корниенко А. Н.
П12 Огонь сшивает металл. — М.: Педагогика,
1980. — 128 с., ил. — (Б-чка Дет. энциклопедии
«Ученые — школьнику»).

30 коп.

В книге академика Б. Е. Патона и кандидата технических наук А. Н. Корниенко рассказывается об одном из самых распространенных технологических процессов — сварке. Читатели узнают об основных этапах развития сварки, о большом вкладе в эту область науки и техники русских и советских ученых и изобретателей. С совершенствованием методов сварки увеличивается прочность и долговечность конструкций, экономия металлов, снижается стоимость и сокращаются сроки работ. Эта область науки и техники, несомненно, заинтересует многих читателей, в том числе и школьников, выбирающих профессию.

60403—011
П 54—80.4306000000
005(01)—80

ББК 34.641

Плывет корабль. Его корпус и надстройки сварены. Мчится поезд — его электровоз и вагоны сварные. И рельсы, по которым он мчится, и мосты, через которые лежит его путь, сварены. Не обошлось без сварки и при создании ракет и самолетов, при строительстве жилых домов, электростанций, фабрик, заводов. Прогресс техники во многом основан на совершенствовании способов соединения деталей. В настоящее время сварка во многих случаях определяет технологический уровень производства в целом. Она стала ведущим и завершающим технологическим процессом соединения деталей.

Наиболее важные исследовательские работы в области сварки ведутся в г. Киеве, в Институте электро-сварки, носящем имя его основателя — Евгения Оскаровича Патона. Институту поручено координировать научные исследования по сварке в нашей стране. Город Киев стал признанной столицей сварщиков.

Сварка применяется для возведения новых конструкций, для ремонта машин и аппаратов, восстановления разрушенных сооружений. Сварные конструкции несут свою службу при сверхвысоких и сверхнизких температурах, при давлении, превосходящем атмосферное, и в условиях космического вакуума.

Современные достижения в области сварки позволяют соединять не только металлы, но и пластмассы, стекло, некоторые виды керамики и другие материалы. Сварку выполняют на воздухе, под водой и в вакууме, в знойных песках Сахары и во льдах Арктики. Летчики-космонавты СССР Г. С. Шонин и В. Н. Кубасов на борту космического корабля «Союз-6» впервые в мире осуществили сварку в условиях космического вакуума и невесомости.

Сварка теснит другие способы неразъемного соединения металлов: клепку, литье, ковку. Но часто вступает она и в творческое содружество со своими конкурентами. В результате создаются сварно-литые, сварно-кованные и сварно-штампованные изделия.

Развитие сварки обусловлено тем, что она увеличивает прочность и долговечность конструкций, экономит металл, снижает стоимость и сроки работ.

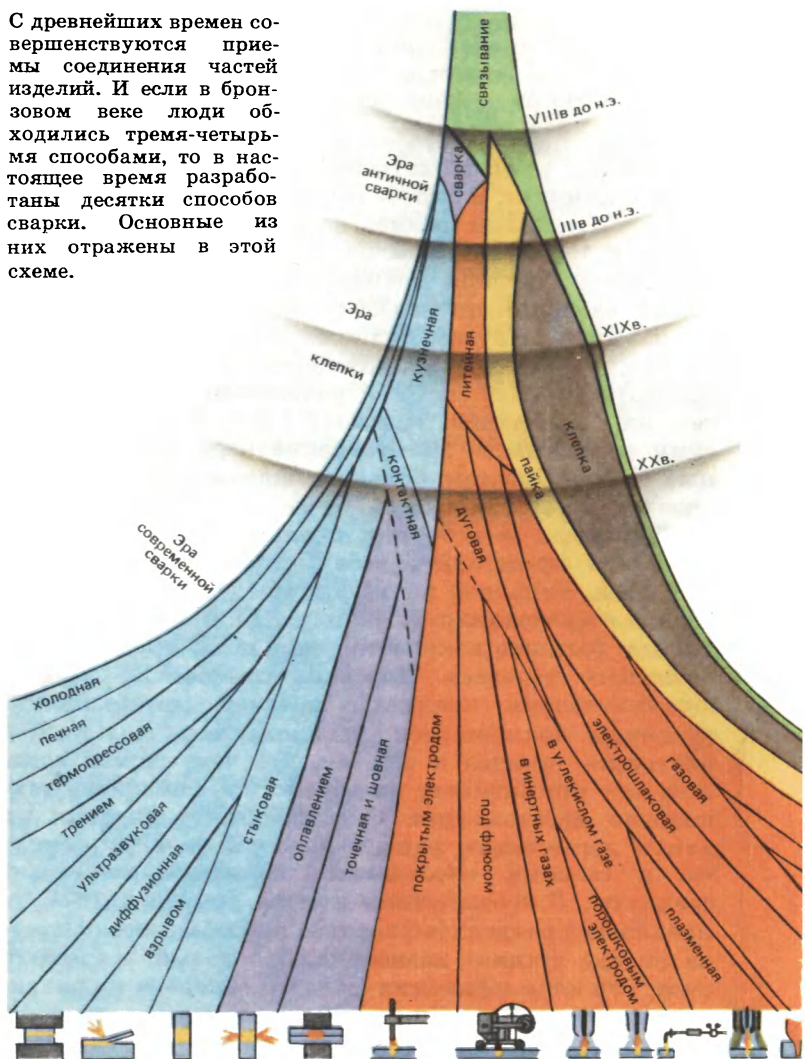
Перед подрастающим поколением ученых, инженеров и рабочих-сварщиков стоит множество творческих задач, решение которых требует пытливого ума, большой эрудиции и энергии.

О том, что изучает сварочная наука, о путях ее развития, о ее научных результатах и технических достижениях рассказывается в этой книге.

Этапы производственной технологии. Первыми орудиями труда и охоты первобытного человека (наряду с камнями и скребками) были каменный топор и связка тяжелых камней на длинных ремнях. Технология, т. е. средства и способы производства, была несложной: древние специалисты отесывали подходящие камни, обламывали ветки деревьев и связывали их друг с другом лианами или жилами убитого животного. Но, чтобы додуматься до этого, т. е. образовать изделие из двух разрозненных частей путем их связывания, нужно было обладать творческим мышлением. Изготовление первых примитивных орудий явилось большим шагом в развитии человечества.

Философы и историки предшествующих времен пытались представить себе историю первобытного общества, опираясь на мифы, предания, археологические исследования. К началу XIX в. археологи накопили большое количество знаний об орудиях первобытного человека. Датский археолог К. Томсен, систематизируя предметы древней материальной культуры, хранившиеся в Национальном музее в Копенгагене, пришел к выводу, что чем старше изделия, тем примитивнее их обработка, тем проще технология изготовления. Оказалось, что изделия из камня изготовлены раньше изделий из меди и бронзы, а самыми «молодыми» являются железные предметы. В соответствии с этим Томсен в 1836 г. предложил разделить развитие первобытного общества на три стадии: **каменный, бронзовый, железный века**. Эта классификация была им основана на различии материалов, из которых преимущественно изготавливались изделия в соответствующие века. Однако

С древнейших времен совершенствуются приемы соединения частей изделий. И если в бронзовом веке люди обходились тремя-четырьмя способами, то в настоящее время разработаны десятки способов сварки. Основные из них отражены в этой схеме.

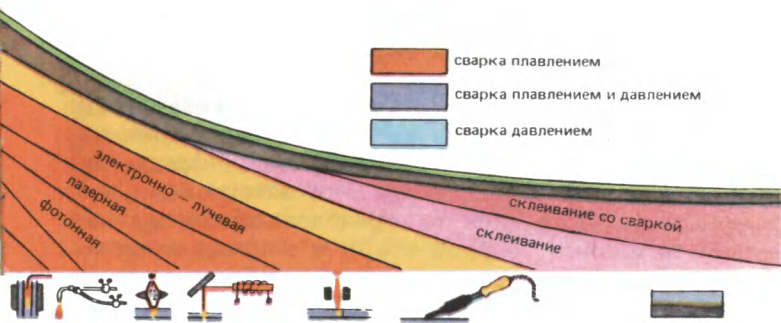


различия были не только в материалах, но и в способах их обработки. Сейчас мы знаем много способов соединения деталей, а в первобытные времена главным, а может быть и единственным, было связывание. Способ связывания по времени совпадает с каменным веком.

В бронзовый и железный века, когда начали осваивать металлы, необходимо было создать новую технологию соединения. Первым способом соединения металлов была кузнечная сварка.

Эра кузнечной сварки. Камнем подходящей формы человек начал выковырывать из самородков золота, серебра, меди разнообразные орудия и предметы потребления. Не исключено, что этим же технологическим приемом «сковывали» вместе несколько кусков металла без подогрева. Даже в настоящее время для соединения металлов, обладающих хорошими пластическими свойствами, применяют холодную сварку, основанную на приложении деформирующих усилий.

С появлением нового материала — бронзы (сплав меди с оловом) пришлось древним специалистам разрабатывать и новые способы соединения. Бронза об-



ладала лучшими, чем исходные материалы, свойствами: более высокой твердостью, прочностью, сопротивляемостью истиранию. Однако она менее пластична, чем медь. Поэтому кузнечная сварка бронзовых изделий даже с подогревом не могла дать высокого качества соединения. И тогда возникла **литейная сварка**, при которой края соединяемых деталей заформовывали (окружали специальной земляной смесью) и заливали перегретым жидким металлом. Этот присадочный металл сплавлялся с деталями и, застывая, образовывал шов. Такие швы были обнаружены на бронзовых сосудах, сохранившихся со времен Древней Греции и Древнего Рима.

В III—II тысячелетиях до н. э. в различных районах земного шара для изготовления орудий труда и оружия начали применять железо. В процессе производства этого металла важное место занимала кузнечная сварка криц. Крицы — это бесформенные глыбы весом 50—100 кг, состоящие из зерен чистого железа и железистого шлака. Крицы получали из железной руды при нагревании ее вместе с древесным углем. Спекшиеся частицы восстановленного железа, угля и шлака неоднократно проковывали в горячем состоянии. При этом отдельные частицы железа соединялись — сваривались, образуя плотный металл, а частицы шлака и угля выдавливались. Для того чтобы увеличить массу металла, отдельные заготовки разогревали до белого каления, складывали вместе и проковывали.

Высокого мастерства достигли кузнецы-сварщики в изготовлении орудий труда и оружия во времена средневековья. При помощи кузнечной сварки, полагаясь на опыт и интуицию, они изготавливали металл с чередующимися в определенной последовательности слоями твердой стали и мягкого железа. Многослойные лезвия плугов и мечей были самозатачивающимися.

Холодная, литейная и кузнечная сварка — первые технологические процессы в истории техники, при помощи которых люди смогли получить неразъемные соединения металлов. При этих процессах прочное сцепление соприкасающихся поверхностей достигалось за счет взаимодействия атомов.

В это же время начали применять **пайку** металла, при которой металлы соединяются с помощью третьего, легкоплавкого металла, так называемого припая.

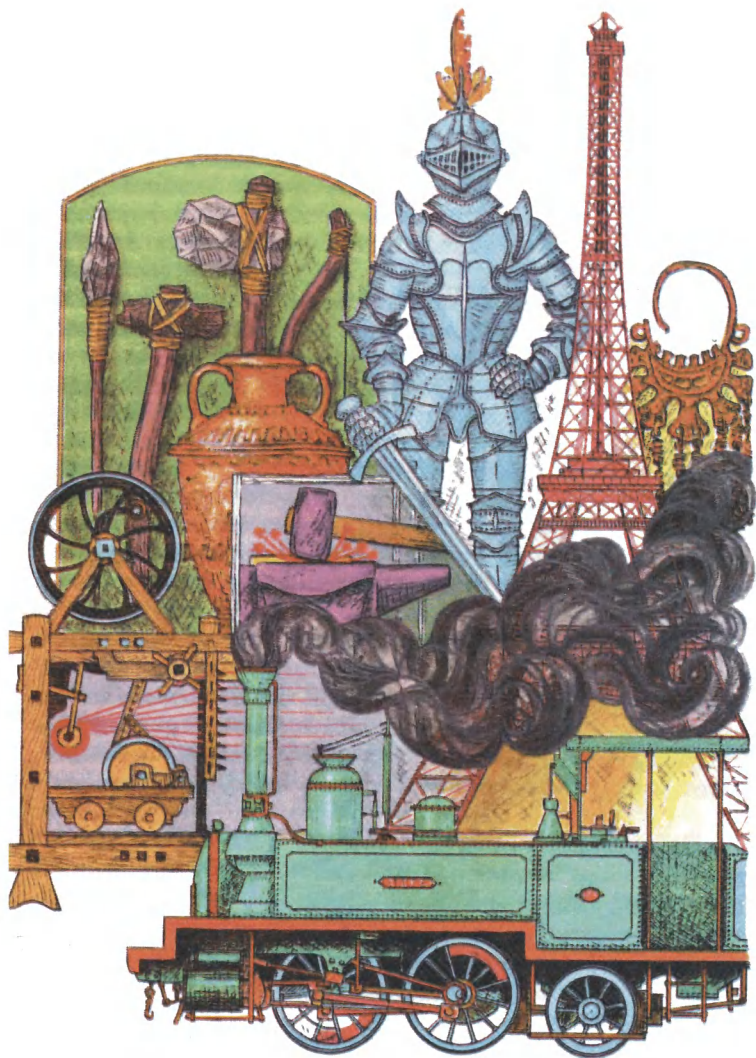
Первые способы сварки были несовершенны из-за отсутствия в то время мощных источников тепла. Очень трудно было равномерно нагревать большие конструкции и сложные изделия и незамедлительно проковывать место соединения или полностью заливать стык — металл быстро остывал.

Поэтому уже в позднем, бронзовом веке начали применять еще один вид соединений металлов — **клёпку**. Прежде чем соединить два металлических листа, их подгоняли друг к другу, пробивали в них отверстия, готовили и разогревали заклёпку, вставляли их в отверстия и расклепывали кувалдой.

В средневековье основными строительными материалами были дерево и камень. Для их соединения сварка не требовалась, а с изготовлением немногочисленных металлических изделий вполне справлялись благодаря уже известным способам сварки. Особенно часто применяли клепку и кузнечную сварку.

На пути к современной сварке. В XVIII в. возникло машинное производство. Резко возросла потребность в металлах, металлических сооружениях, средствах транспорта, механизмах, паровых машинах и др. Понадобились и новые, более производительные, уникальные способы соединения и ремонта металлических изделий.

Новые открытия в физике и химии, научно-инже-



нерные разработки в механике, электротехнике, металлургии, а также освоение промышленного производства и применение в различных отраслях техники электроэнергии, кислорода, горючих газов позволили разработать новые способы сварки.

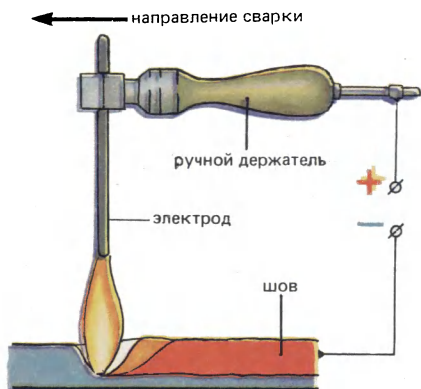
В конце XVIII в. итальянский физик А. Вольта создал длительно работающий источник электрической энергии — вольтов столб. Это послужило толчком к применению электричества в сварке. В 1802 г. русский ученый В. В. Петров открыл явление электрической дуги и доказал возможность использовать ее для расплавления металлов. В 1841—1842 гг. английский ученый Дж. Джоуль и русский ученый Э. Х. Ленц независимо друг от друга сделали открытие: определили количество тепла, выделяющегося в проводнике при прохождении через него электрического тока.

Разработкой новых источников тепла успешно занимались и химики: русский ученый Н. Н. Бекетов, французские ученые Б. Бертло и Ле Шателье.

Во второй половине XIX в. промышленность получила новые физико-химические средства воздействия на металл, которые начали оттеснять на второй план механические инструменты.

Явление электрической дуги, открытое русским ученым В. В. Петровым, стало использоваться в прожекторах и специальных лампах для освещения, приборах для выпрямления тока и управления его силой, в металлургии для нагрева и плавления металлов.

Русский изобретатель Н. Н. Бенардос в 1881 г. изобрел способ дуговой сварки угольным электродом и назвал его в честь древнегреческого бога-кузнеца электрогефестом. Чтобы сварить детали электрической дугой, не требовалось нагревать их целиком. Металлические конструкции любых размеров и любой конфигурации стало возможным соединять прочны-



Первоначальный вариант способа дуговой сварки Н. Н. Бенардоса. Угольный электрод и изделие подключали к источнику питания. Дуга силой тока до 100—150 А плавила кромки свариваемых деталей. Между кромками образовывалась общая для них ванна жидкого металла. На месте застывшей ванны получается монолит сварного шва.

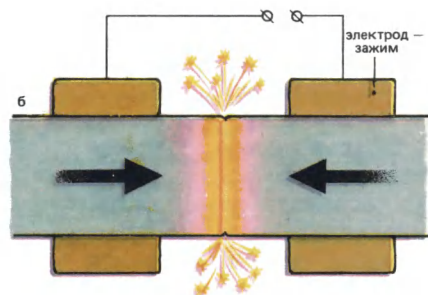
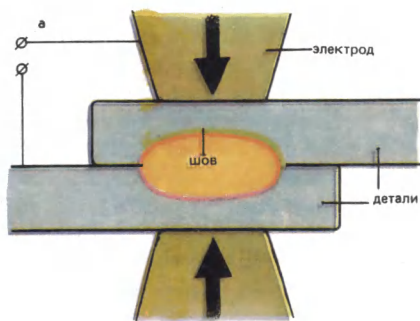
ми и плотными швами. Так появилась **электродуговая сварка** — выдающееся изобретение XIX в.

Электродуговая сварка сразу же нашла применение в наиболее сложной в то время отрасли промышленности — паровозостроении. Чтобы облегчить процесс сварки, изобретатель сконструировал электродержатели, окруженные газовыми горелками.

Открытие Н. Н. Бенардоса усовершенствовал его современник Н. Г. Славянов, заменив угольный электрод металлическим плавящимся. Изобретатель предложил применять шлак, который защищал свариваемый шов от попадания в него воздуха, и шов становился более прочным и надежным. В 1886 г. английский ученый Э. Томсон и в 1887 г. Н. Н. Бенардос получили патенты на контактную сварку. При контактной сварке соединяемые детали зажимали между электродами. Проходящим током детали нагревались на отдельных участках и сдавливались.

В конце XIX в. был предложен способ сварки, основанный на применении ацетилено-кислородного пламени.

Мощности дуги и пламени хватало для соедине-



Электрическая контактная сварка (сопротивлением). Через предварительно сжатые детали пропускают ток. В зоне соприкосновения деталей, которая имеет наибольшее сопротивление по сравнению с остальными участками сварочной цепи (электродами, проводами), выделяется наибольшее количество тепла. Нагрев до расплавления или пластического состояния и усилие сжатия образуют сварное соединение. На схеме показаны: а) точечная сварка; б) стыковая сварка.

ния стали, меди, латуни толщиной в несколько миллиметров. Для сварки стыков рельсовых путей и стальных труб применяли термиты (зернистые смеси алюминия или магния с окислами железа). При их сгорании образуется металлическое железо и выделяется большое количество тепла. Порцию термита сжигали в огнеупорном тигле и расплав выливали в зазор между стыками.

Таким образом, в последние два десятилетия XIX в. было предложено превращать электрическую энергию и энергию химических реакций в тепло, необходимое для сваривания металла. Однако все эти способы сварки еще не вытеснили клепку, так как швы получались невысокого качества.

Сварка в эпоху научно-технической революции.

В основу современных способов сварки легли выдающиеся достижения науки и техники XX в.

Области применения сварки непрерывно расширяются. Сварка стала ведущим технологическим процессом при изготовлении и ремонте металлических конструкций и изделий в промышленности, строительстве, транспорте, в сельском хозяйстве и т. д. Но еще не все способы сварки достаточно разработаны. Некоторые только осваиваются, возможности их еще познаются, и основное применение их — в перспективе. Другие уже достигли совершенства. Есть и такие, что уже не удовлетворяют некоторым требованиям современной техники.

Способы сварки разделяются по виду энергии, применяемой для получения сварного соединения, на **механические, химические, электрические, электро-механические, химико-механические, лучевые** и др. Например, к механическим способам относится сварка трением, холодная, ультразвуковая и др.; к химическим — газовая и термитная; к электрическим — дуговая, электрошлаковая, плазменно-дуговая и др.

А если рассматривать способы сварки с позиции «кто и чем ее выполняет», то многие способы можно разделить на **ручные, механизированные, полуавтоматические, автоматические**. В зависимости от метода получения сварного соединения различают такие основные группы сварочных процессов: сварка **плавлением и давлением**. При сварке плавлением специальный источник теплоты нагревает и расплавляет кромки соединяемых деталей на небольшом участке. При сварке давлением, для того чтобы произошло схватывание кромок, их сдавливают. Иногда, чтобы облегчить схватывание, место сварки нагревают до пластического состояния металла или даже до расплавления. Большинству способов сварки название дано по виду энергии и физическим явлениям, бла-

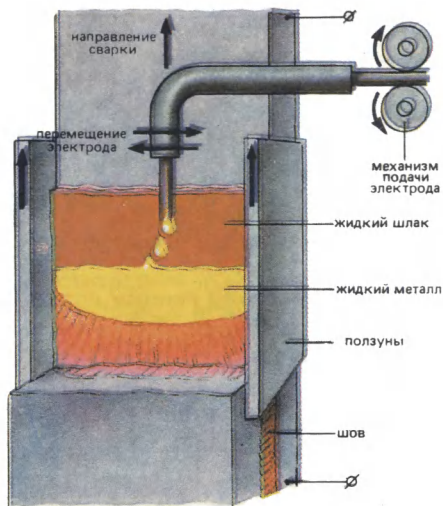
годаря которым обеспечивается межатомная связь в месте соединения.

В настоящее время наиболее часто применяются способы **дуговой сварки**, поэтому о них мы расскажем подробно в следующих главах. Дуговую сварку мы возьмем за основу при описании различных разделов сварочной науки. Способы дуговой сварки, а также газовая, термитная, электрошлаковая, электроннолучевая, лазерная и ряд других относятся к сварке плавлением.

К сварке давлением относятся следующие способы сварки: контактная, газопрессовая, диффузионная, холодная, трением, ультразвуковая, взрывом и некоторые другие. Каждый из этих способов имеет определенные технологические возможности и применяется при изготовлении конкретных изделий с учетом требований производства.

Газовая сварка, самая распространенная в начале XX в., а теперь отставшая от других способов по производительности, применяется в основном при ремонтных работах, а также там, где нет электричества. Возможности этого способа ограничены: газовое пламя соединяет металл (сталь, медь, чугун) толщиной только до нескольких миллиметров.

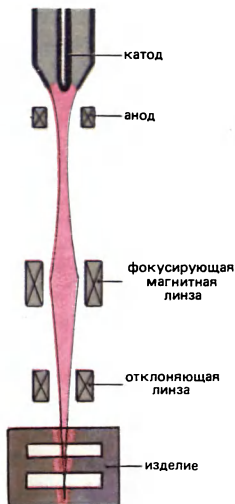
Для изготовления стальных, медных, титановых, алюминиевых конструкций толщиной до нескольких метров и изделий с большим сечением швов (котлы, станины прессов и др.) в Институте электросварки им. Е. О. Патона разработали способ **электрошлаковой сварки**. «Русская сварка» (так называли за рубежом электрошлаковую сварку) была отмечена большой золотой медалью «Гран-при» на Всемирной выставке в Брюсселе. Фирмы многих стран мира купили аппараты для электрошлаковой сварки, приобрели лицензии. В Советском Союзе с помощью электрошлаковой сварки изготовлены сотни тысяч тонн самых разнообразных конструкций, в том числе



Электрошлаковая сварка. Свариваемые кромки и присадочный (электродный) металл нагреваются теплом, выделяющимся в шлаковой ванне. Электрод (в виде проволоки или пластин) и изделие подключают к разным полюсам, а ток проходит через жидкий шлак. Жидкий электродный металл накапливается в пространстве между кромками и специальными формирующими ползунами, которые поднимаются по мере заполнения пространства и остывания металла.

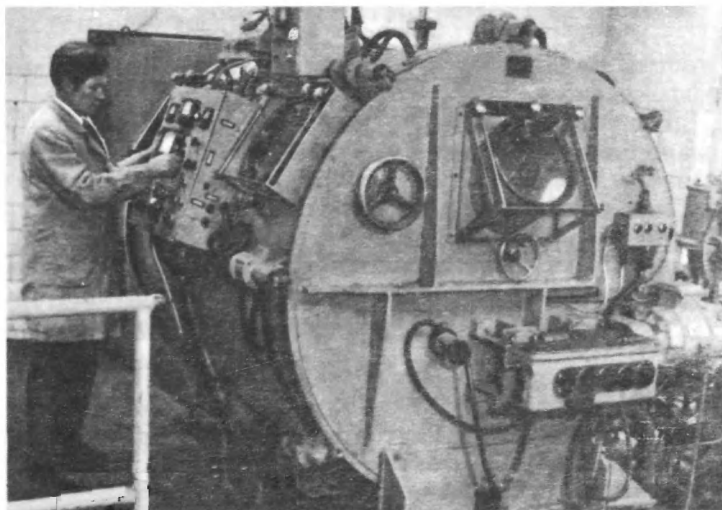
уникальные по размерам и весу сварно-литые элементы крупных машин.

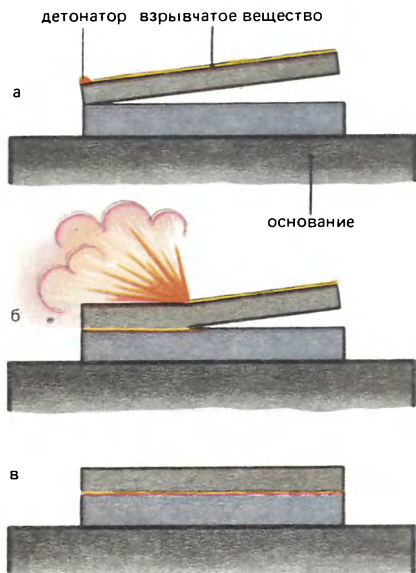
Соединения толщиной в доли миллиметра и до нескольких дециметров можно выполнить **электроннолучевой сваркой**. Электроннолучевая сварка ведется в условиях вакуума, необходимого для свободного движения электронов и чистоты металла шва. Благодаря высокой концентрации энергии (до 10^8 Вт/см²) и глубокому вакууму этот способ незаменим при производстве всевозможных электровакуумных приборов. Он обеспечивает герметизацию под вакуумом без дополнительной откачки. В атомной энергетике электроннолучевая сварка применяется для заварки топливных элементов. Электронный луч пробивается в узкие зазоры между деталями разделки, проникает через несколько слоев, соединяет толстые элементы с тонкими. Эти типы соединений позволяют создавать новые, более простые конструкции



Электроннолучевая сварка ведется в условиях вакуума сфокусированным потоком электронов. Под действием электрического поля электроны приобретают кинетическую энергию, равную половине произведения массы электрона на квадрат скорости движения. Эта кинетическая энергия расходуется при взаимодействии электрона с веществом изделия.

Камера для электроннолучевой сварки.





Сварка взрывом. Одна из деталей устанавливается на массивном основании. Другая деталь, на поверхность которой укладывают слой взрывчатого вещества, устанавливается под углом к первой. Заряд подрывается с одного конца, взрывная волна создает огромное давление одной детали на другую.

многих важнейших машин и аппаратов, наиболее эффективно использовать свойства материалов.

В начале 60-х гг. XX в. были созданы **лазерные сварочные установки** импульсного действия, а в настоящее время успешно проходят испытания аппараты для непрерывной лазерной сварки большой мощности.

Луч лазера может сваривать как однородные, так и разнородные металлы. Сварные соединения при этом отличаются хорошими механическими свойствами.

Диффузионная сварка основана на явлении диффузии в вакууме. Диффузия (проникновение молекул одного вещества в другое) протекает более интенсивно, когда соединяемые детали одновременно нагреваются и сдавливаются. Сварку ведут в вакуум-

ной установке, из которой выкачан воздух до 10^{-4} мм рт. ст. Детали нагревают до $600\text{--}800^{\circ}\text{C}$ токами высокой частоты. При такой температуре разрушаются окисные пленки на поверхности соединяемых металлов, препятствующие диффузии. Сдавливание и хорошая подгонка поверхностей облегчают диффузию. Этим способом соединяют даже детали из хрупких материалов, в том числе и из разнородных металлов и неметаллов. Однако для диффузионной сварки необходима сложная аппаратура, размеры деталей ограничены размерами вакуумной камеры, и на процесс диффузии затрачивается много времени — 10—30 мин.

Самый быстрый способ сварки — **сварка взрывом**: поверхности в несколько квадратных метров соединяются за тысячные доли секунды. При этом можно соединить детали, разные по массе, детали из разнородных металлов. Такой способ успешно используют при изготовлении изделий, которые нельзя нагревать. Например, при монтаже оболочек телефонных кабелей. В 1956 г. токарь А. И. Чудиков получил сварное соединение на обычном токарном станке. К вращающейся в патроне детали он прижал другую, неподвижную. Торцы деталей за несколько секунд разогрелись докрасна, и, как только вращение прекратилось, детали прочно сварились. Простой технологический процесс **сварки трением** удалось легко автоматизировать. Этот способ успешно применяется благодаря высокой производительности и возможности соединять разнородные металлы. Особенно он эффективен при изготовлении металлорежущего инструмента из обычной мягкой стали, к которой приваривается небольшая режущая часть из дорогостоящих специальных сплавов.

Для соединения металлов толщиной в несколько микрон разработана **ультразвуковая сварка**. В зону сварки наконечник специального сварочного инстру-

мента передает механические колебания частотой в несколько десятков килогерц. Под действием ультразвуковых колебаний разрушаются окисные пленки на соединяемых поверхностях, и они нагреваются. При этом наконечник сдавливает кромки и тем самым помогает образованию соединения.

В начале 70-х гг. XX в. ультразвук стали применять для соединения, наплавки и резки живых тканей. Работа сварщиков под руководством Героя Социалистического Труда члена-корреспондента АН СССР Г. А. Николаева совместно с медиками увенчалась большим успехом. Сварочным аппаратом хирурги стали наплавлять костные ткани человека.

Разработаны способы соединения материалов без их расплавления. Это **пайка** и **склеивание**.

Во время пайки межатомная связь возникает, когда поверхности кромок смачиваются расплавленным металлом — припоем.

Склеивание применяется для тех сплавов и пластмасс, которые теряют свои свойства при нагревании или сдавливании. Этот способ применил известный советский авиаконструктор Герой Социалистического Труда академик АН УССР О. К. Антонов при создании конструкций самолетов из высокопрочных, но трудно поддающихся сварке алюминиевых сплавов.

Самый распространенный источник тепла

Многими успехами современная сварка обязана замечательному источнику нагрева — дуговому разряду. Теория дугового разряда начала развиваться в конце XIX — начале XX в. Большой вклад в изучение электрической дуги внесли русский физик В. Ф. Миткевич, англичанин Дж. Томсон, немецкий физик И. Штарк и другие. Постепенно дуга стала

все шире применяться в сварочной технике. Дуговая сварка получила особое развитие в 30—50-х гг. XX в. в результате исследований советских ученых В. П. Никитина, Е. О. Патона, К. К. Хренова, М. Н. Броуна, Г. И. Погодина-Алексеева, Г. М. Тиходеева и других.

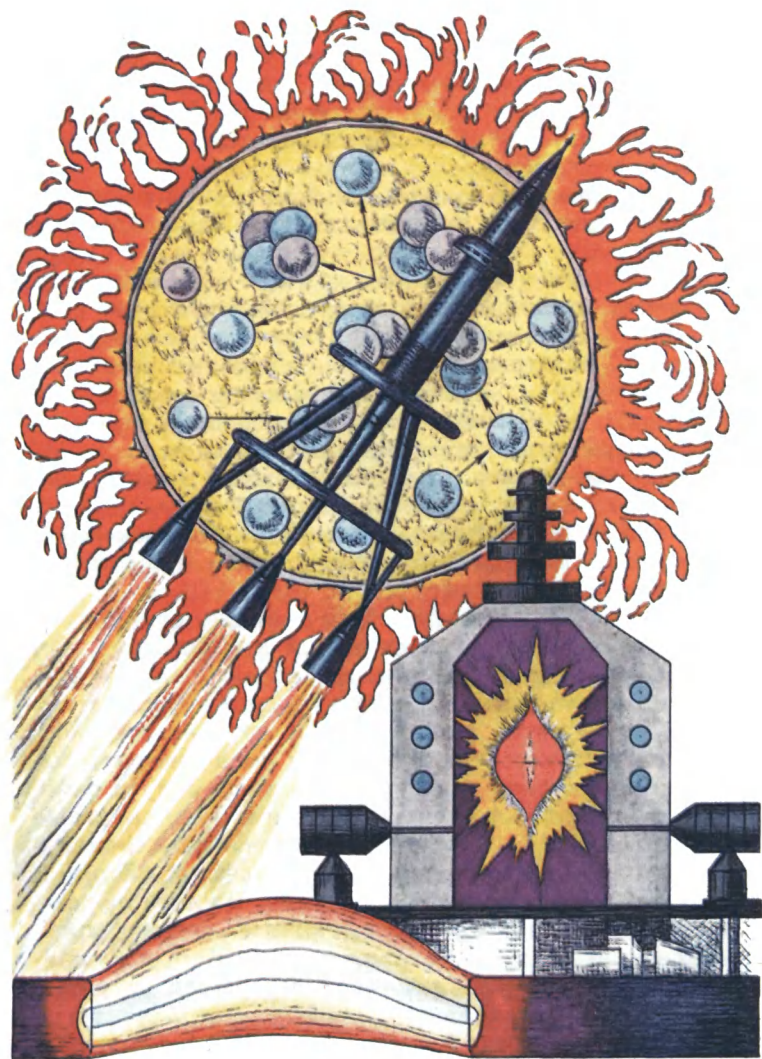
Чтобы понять, на чем основана дуговая сварка, нужно хорошо себе представлять, что такое электрическая дуга.

В обычных условиях газы ведут себя как электрические изоляторы, и в воздухе между двумя пластинами, соединенными с источником тока, электрический ток не возникает. Но если в пространство между ними ввести заряженные частицы — ионы или электроны, то ток потечет. Прохождение тока через газ и называется электрическим разрядом.

Известно несколько видов разрядов: темный, коронный, тлеющий, искровой, дуговой и др. Отличаются они величиной тока и напряжения, свечением, звуковыми явлениями, длительностью существования.

Дуга — это устойчивый вид разряда, существующий при токе от десятых долей ампера до тысяч ампер. Это сложное физическое явление в наше время привлекает внимание многих ученых. Ведь до сих пор дуга остается единственным источником энергии, который может долгое время поддерживать высокотемпературные процессы. С помощью дуги работают термоядерные электростанции и межпланетные ионные ракетные двигатели. Астрофизики моделируют процессы, происходящие в звездах. Химики синтезируют различные соединения. Но дуга не всегда помощник: электрикам приходится решать проблемы гашения дуги, которая возникает в выключателях и может стать причиной серьезных аварий.

Для сварщиков важно, чтобы дугу было легко возбудить, чтобы она была устойчивой и более управ-





Скоростная киносъемка позволяет зафиксировать мгновенные изменения формы дуги, яркость свечения отдельных ее участков.

ляемой. В этом направлении и работают ученые, занимающиеся проблемами дуговой сварки.

Как возникает дуга. Известно несколько способов возбуждения дугового разряда. По способу В. В. Петрова два электрода сводят до соприкосновения и сразу же разводят на небольшое расстояние. В этот момент между ними и вспыхивает дуга.

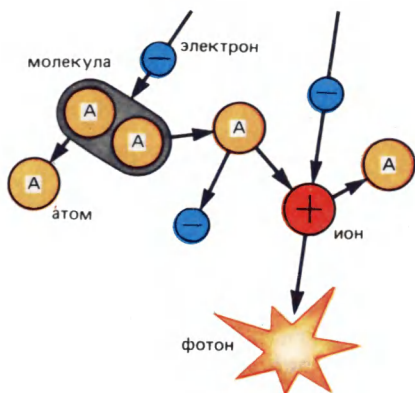
Как объяснить это явление? Упрощенно можно представить себе это так: при соприкосновении электродов электрическая цепь замыкается и по ней идет ток. В соответствии с законом Джоуля — Ленца в проводниках выделяется теплота. Место контакта двух электродов, которое обладает самым большим сопротивлением, нагревается сильнее и быстрее остальных участков цепи. При высокой температуре начинается испарение материала электрода и возникает явление так называемой **термоэлектронной эмиссии** (термоэмиссия) — испускание электронов под действием теплового возбуждения. Если в этот момент разорвать контакт между электродами,

возникнет электрическое поле, подобное полю, возникающему между обкладками конденсатора. На катоде, подключенном к отрицательному полюсу источника тока, собираются те электроны, которые вылетают благодаря термоэмиссии. А при достаточной напряженности электрического поля возникает явление **автоэлектронной эмиссии**: электроны вырываются с поверхности катода под действием электростатических сил.

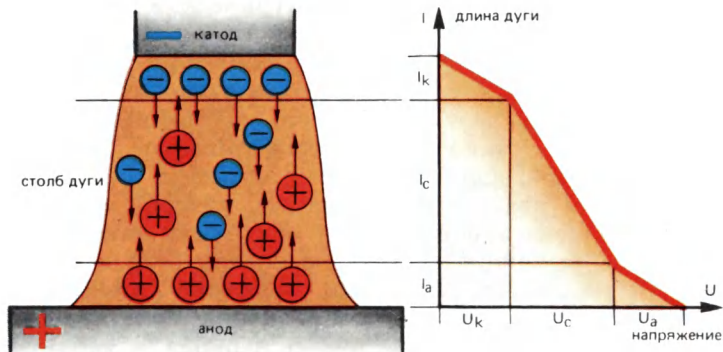
В результате этих процессов в пространстве между электродами появляются свободные электроны. Сталкиваясь с молекулами и атомами газа и испарившегося электродного материала, электроны «раскалывают» их на ионы и новые электроны (такое явление называют **вторичной эмиссией**). В ионизированном таким образом пространстве развивается дуговой разряд.

Строение дуги. В пространстве между электродами (дуговом промежутке) находится светящийся электропроводящий канал — **столб дуги**. Светятся и раскаленные концы электродов. По яркости свечения можно определить температуру. На поверхности катода и анода — в так называемых активных пятнах дуги — она достигает огромной величины, при которой плавится и кипит самый тугоплавкий металл электродов. Температура в столбе дуги при сварке достигает десятков тысяч градусов.

Длина дуги редко превышает 1—2 см, диаметр столба — и того меньше. Плазма дуги концентрируется в объеме около 1 см^3 . Но и в этом небольшом пространстве можно выделить три области. Две из них пограничные между электродами и ионизированным газом, третья — собственно электродный промежуток, заполненный ионизированным газом. В каждой из областей ученые обнаружили свои особенные явления.



Приход и расход энергии, падение напряжения в приэлектродных областях и в столбе дуги зависят от характера взаимодействия электронов, ионов, атомов и молекул. Общее падение напряжения в дуге равно сумме трех составляющих: $U_g = U_k + U_e + U_a$. Ток дуги складывается из тока ионов $I = I_n + I_z$.



Что происходит в столбе дуги. Столб дуги заполнен заряженными частицами. Почти всегда там присутствуют и нейтральные частицы — атомы и даже молекулы паров веществ, из которых сделаны электроды, и газов, окружающих дугу.

На движение частиц оказывают действие силы, вызванные разностью давлений из-за неодинаковой концентрации частиц, кулоновским взаимодействием между электронами и ионами и рядом других при-

чин. Поэтому траектория движения частиц имеет очень сложную форму. Под действием различных сил частицы перемещаются.

Быстрее всего перемещаются электроны. Маленькие, подвижные, они легко разгоняются и, сталкиваясь с атомами и ионами, передают им свою энергию. Столкновения электрона с атомами могут быть упругими и неупругими.

При упругих столкновениях ничего заметного не происходит. Эти столкновения похожи на удары друг о друга теннисных мячей. Атом, в который попал электрон, начинает двигаться быстрее — увеличивается его кинетическая энергия. В результате повышается температура плазмы.

Тот электрон, который в электрическом поле приобрел достаточно большое количество энергии, является виновником неупругих столкновений. Попав в атом, он возбуждает его, а когда удар достаточно силен, то и выбивает из атома его собственные электроны. Атом становится положительным ионом: однозарядным, если выбит один электрон, двузарядным — если два, и т. д. Энергию, которая должна быть сообщена электроду для ионизации какого-либо атома, выражают в электровольтах (ЭВ) и называют **потенциалом ионизации**. Величина потенциала ионизации зависит от строения атома. Чем меньше номер группы и больше номер периода в таблице элементов Менделеева, тем меньше энергии необходимо затратить для ионизации. Наименьшим потенциалом ионизации (3,9 ЭВ) обладает атом цезия. Он самый тяжелый из всех щелочных металлов. Самый легкий из инертных газов — элемент последней, нулевой группы — гелий обладает наивысшим потенциалом ионизации (24,5 ЭВ).

Энергия, расходуемая на диссоциацию различных молекул, также различна. Так, например, для диссоциации молекулы водорода необходимо затратить

4,48 ЭВ, фтора — 1,6 ЭВ, а углекислого газа — 9,7 ЭВ.

Эти величины имеют для сварщиков особое значение. При разработке электродной проволоки или защитной среды приходится учитывать поведение в дуге многих элементов, и важно знать, какие газы диссоциируются раньше, а какие — позже, какие элементы ионизируются сначала, а какие — потом и сколько для этого энергии потребуется.

Когда сварочная дуга работает в реальных условиях, на процесс сварки влияют особенности среды, окружающей дугу, материалы, из которых сделаны электроды, и т. д.

Явления у катода и анода. Сложны процессы в плазме столба дуги, но процессы у поверхности электродов еще сложнее. Именно здесь прерывается течение электронов по металлическому проводнику — электроду и начинается другой вид тока — ток дуги, который создается как электронами, так и ионами. Изменяется характер явлений не только электрических, но и термических. Именно здесь горячая плазма граничит со сравнительно холодной поверхностью электродов, нагретых всего на каких-то 2—3 тыс. градусов. Да и среда в этих переходных областях неопределенная. Неизвестно, сколько в ней газа, а сколько паров материала электродов.

Протяженность переходных областей очень мала и в обычных сварочных условиях составляет тысячные доли сантиметра. Через активные пятна в металл поступает основная часть тепла. Удельный тепловой поток в пятне нагрева при некоторых способах дуговой сварки превышает 1000 квт/см².

Катодная область — это своеобразный поставщик электронов. Причины выхода электронов могут быть различные. Одна из основных — термоэмиссия, воз-

никающая при высокой температуре. Энергия, необходимая для поддержания высокой температуры катода, пополняется за счет энергии ионов, бомбардирующих катодную поверхность, или за счет энергии ионов постороннего источника нагрева. В некоторых случаях и фотоны могут выбивать из катода электроны.

Катодное пятно обычно занимает очень маленькую площадь, и поэтому линии тока в дуге, если их условно себе представить, как бы сжимаются там, где кончается столб и начинается электрод. Здесь расходуется часть энергии дуги, необходимая для поступления первичных электронов и пополнения тепла, уходящего с электрода.

В отличие от катода анод непрерывно бомбардируется электронами, которые он притягивает из столба дуги. Электроны, ударяясь о поверхность анода, разогревают его, проникают в его материал и превращаются в электроны металлической проводимости. На аноде в обычных условиях выделяется больше тепла, чем на катоде.

Факторы, влияющие на поведение частиц. Чем сильнее напряженность электрического поля между электродами, тем больше энергии сообщает оно электронам и ионам. Увеличивается интенсивность ионизации, а с ней изменяется и плотность токопроводящих частиц. Но проводимость дуги изменяется по своим, более сложным законам, отличающимся от проводимости металла.

Кроме электрического поля на поведение частиц в столбе дуги влияет еще много факторов: и **термическая диффузия** — стремление разогретых частиц «разбежаться» в разные стороны; и **пинч-эффект** — воздействие магнитного поля, возникающего вокруг столба и стремящегося его сжать; и «неустойчивость» различных типов; и струи плазмы и пара и.

др. В зависимости от условий, в которых существует дуга, влияние этих факторов может ослабевать или, наоборот, усиливаться.

Дуга встречается с металлом

Многие исследователи в различных странах мира занимались изучением физических процессов, протекающих при сварочном нагреве, особенностей плавления металла кромок и формирования шва. Постепенно раскрывали они тайны превращений отдельных частей изделия в прочное монолитное соединение.

К.п.д. сварки. При сварке необязательно, а чаще всего просто невыгодно нагревать все изделие. Для того чтобы как можно эффективнее использовать тепло, необходимо сконцентрировать его так, чтобы за кратчайший срок нагреть кромки на такую глубину и только до такой температуры, при которой уже возможно сваривание. Когда хотят охарактеризовать «тепловые» способности сварочного источника тепла, в первую очередь говорят о **тепловой мощности** — о том количестве тепла, которое выделяется при преобразовании электрической, химической, механической и другой энергии в единицу времени. Определяется тепловая мощность расчетным и экспериментальным путем.

Например, чтобы узнать мощность дугового разряда, замеряют силу тока в цепи (J) и падение напряжения между электродом и изделием (U_g) и проводят расчет по формуле $Q = J \cdot U_g$ (Вт).

Однако не все тепло доходит по назначению. Часть его рассеивается в атмосферу, уходит на нагрев сварочной установки и окружающих предметов. А то, что остается от общей тепловой мощности и

поступает на изделие, называют **эффективной мощностью**. Важный показатель при сравнении источников тепла — **эффективный коэффициент полезного действия** — отношение эффективной мощности к полной тепловой мощности.

Эффективный коэффициент полезного действия для различных видов сварки изменяется в зависимости от особенностей технологии, глубины проплавления и других условий. Так, эффективный к.п.д. для дуговой сварки изменяется от 0,5 до 0,9, для газовой сварки — 0,25 до 0,7.

Как расходуется тепло. Эффективный к.п.д. — важный показатель процесса. Знать его величину нужно при расчетах деформаций сварных конструкций, при определении зон нагрева и для многих других целей. Но источники тепла имеют и другие особенности, которые нужно обязательно учитывать при выборе способа сварки.

По степени концентрации тепла — плотности теплового потока в пятне нагрева ($\text{кал/см}^2\cdot\text{с}$ или Вт/см^2) и наибольшей тепловой мощности, вводимой в изделие (Вт), можно судить о том, какую толщину металла удастся соединить. Так, ацетилено-кислородное пламя обеспечивает плотность теплового потока до 500 Вт/см^2 , а электрическая дуга — $30\,000 \text{ Вт/см}^2$, а если учесть, что наибольшая тепловая мощность, вводимая в изделие, составляет $10\,000 \text{ Вт}$ для пламени и $100\,000 \text{ Вт}$ для дуги, то станет очевидно, что проплавляющие возможности дуги значительно выше.

Возникает вопрос: зачем нужна газовая сварка, если у нее и к.п.д. ниже, и плотность теплового потока самая низкая, да и тепловая мощность невысокая?

Рекомендация варить все дугой, потому что она эффективнее, не лишена теоретического смысла. Вот

только практика, самый строгий оценщик, предъявляет к способам сварки множество разнообразных требований. И бывает много случаев, когда другие свойства становятся гораздо важнее тепловых характеристик.

Так, в начале XX в. дуговая сварка не выдержала конкуренции с молодой газовой сваркой: способ Н. Н. Бенардоса не гарантировал удовлетворительно-го качества металла шва, а способ Н. Г. Славянова не обладал достаточной технологической гибкостью и маневренностью. Только после существенных улучшений процессы дуговой сварки заняли первое место в применении. Улучшить процесс дуговой сварки удалось в результате разнообразных исследований процессов плавления и кристаллизации сварочной ванны.

Ванна, наполненная жидким железом. При сварке плавлением источник тепла расплавляет металл на отдельном участке соединения. Образуется сварочная ванна, ограниченная поверхностью нерасплавленного металла. Источник теплоты (дуга, пламя, электронный луч, луч лазера) «давит» на металл в ванне, оттесняя его от центра к краям и образуя углубление — кратер. При перемещении источника тепла жидкий металл оттесняется к заднему краю ванны — в хвостовую часть. Там происходит кристаллизация и формируется шов. А дуга в это время «подмывает» переднюю, головную часть ванны, расплавляя все новые и новые порции металла.

Жидкий металл ванны непрерывно перемешивается. При постоянной скорости, тепловой мощности источника и других параметрах режима форма и размеры сварочной ванны устанавливаются постоянными. От формы ванны, от ее показателей зависят характер кристаллизации, возможность появления дефектов, распределение примесей и многие

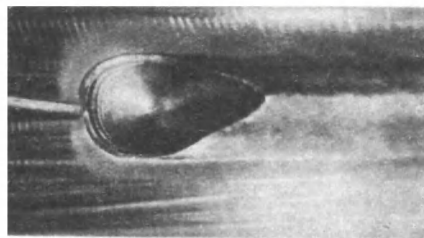
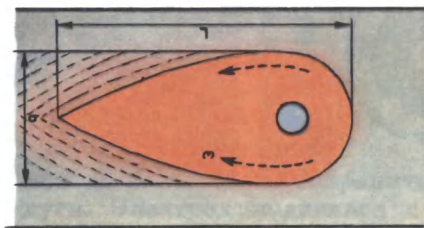
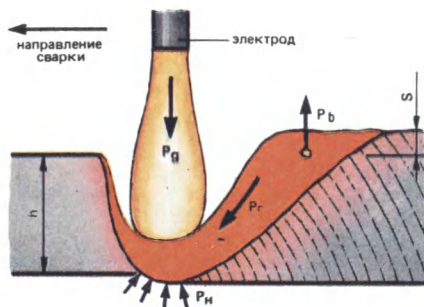
другие процессы, влияющие на качество металла шва. Чтобы управлять этими процессами, их необходимо изучать.

Различные силы действуют на расплавленный металл. Зависят они и от свойств источника тепла, и от теплофизических свойств свариваемого металла, и от режима сварки, и от других параметров. Экспериментировать непосредственно в процессе сварки нелегко. Представьте себе, например, такую задачу. Дано: ослепительная, тысячеградусная, все испаряющая дуга, под ней бурлит расплавленная сталь. Требуется определить температуру стали в радиусе 5 мм от оси дуги на глубине 3 мм от поверхности через 2 с после возбуждения дуги.

Ученые справились и с этой и с другими задачами. Проведены многочисленные измерения с помощью термопар и калориметров, разработаны расчетные методы, таблицы и графики. Сварщики теперь могут определить не только температуру в какой-либо точке ванны, но и среднюю температуру всей ванны, ее теплосодержание, объем, скорость охлаждения и др. А что касается нашей задачи, то окружность радиусом 5 мм располагается в ванне и температура там равняется 2300°C .

Изучая ванну и шов, сварщики установили очень важные закономерности. Зная, что глубина проплавления пропорциональна тепловой мощности дуги, можно рассчитать примерный режим сварки изделий определенной толщины. В такой же зависимости находится и объем сварочной ванны, изменяющийся при различных способах сварки плавления от десятых долей до нескольких десятков кубических сантиметров.

Для расчета металлургических процессов и для многих других целей очень важно знать, сколько же времени металл находится в жидком состоянии. Для различных участков ванны время это неодинаково.



Давление столба дуги (P_g) уравнивается гидростатическим давлением (P_b) жидкого металла, вытесняемого в хвостовую часть ванны.

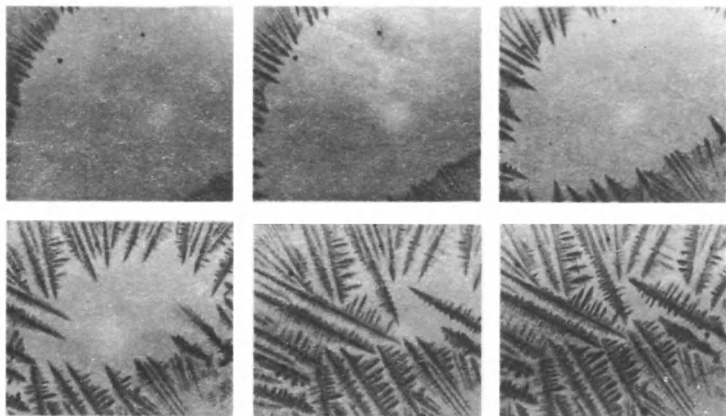
При сквозном проплавлении жидкий металл удерживается снизу силами поверхностного натяжения (P_n). Форма ванны и шва характеризуется шириной (v), глубиной проплавления (h), длиной ванн (l), высотой усиления (S), коэффициентом формы провара ($\epsilon_{пр}$) и другими показателями.

По форме ванна сверху похожа на падающую каплю воды: ее хвостовая часть вытянута и заострена, тогда как головная часть выглядит в виде полукруга.

У края ванны, вблизи границы сплавления, металл кристаллизуется быстро, но чем дальше от края, тем позже он затвердевает, тем дольше металл остается жидким.

При дуговой и газовой сварке время «жизни» расплавленного металла в ванне исчисляется долями и единицами секунд, а при электрошлаковой — минутами. И за это время металл взаимодействует

Процесс кристаллизации
сварочной ванны.
Интервал между кад-
рами — 0,2 с.

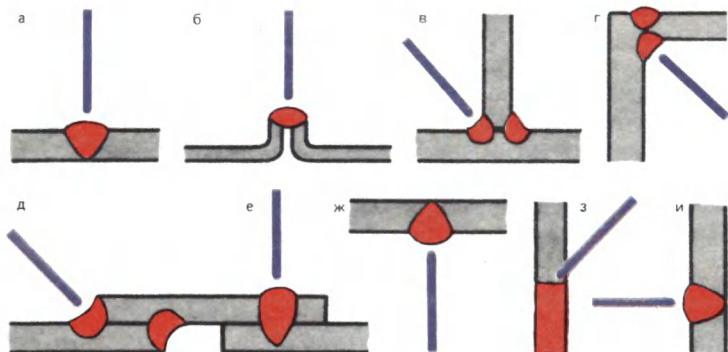


с частицами шлака и пузырьками газа, занесенными в ванну или образовавшимися в ней. Очевидно, что если шлак или газ «застрянут» в металле, то они испортят шов — уменьшат его прочность и пластичность, могут нарушить и герметичность. Задача сварщиков — избавиться от нежелательных примесей. И хотя при решении ее встречается много трудностей, природа предусмотрела несколько явлений, которые, если их правильно использовать, облегчают выполнение этой задачи. Например, на шлак и газы действует выталкивающая сила, потому что их плотность меньше плотности металлов. Сила эта направлена против силы тяжести. Значит, если ванна находится в нижнем положении, то шлаковые включения и поры будут стремиться всплыть. Нужно только помочь им преодолеть силы, препятствующие всплытию.

Жидкий металл становится твердым. Металлы и сплавы в твердом состоянии — кристаллические тела. Как же кристаллизуется металл ванны?

Частицы расплавленного металла по мере снижения температуры становятся менее подвижными. Тепло от ванны отводится в стенки. Между твердым металлом стенок и кристаллизующимся слоем устанавливаются обычные металлические связи, образуются общие кристаллиты, растущие за счет присоединения соседнего жидкого металла. Такое «наращивание» кристаллов идет от краев к середине и от хвостовой части ванны к головной. Поскольку сначала затвердевают более тугоплавкие составляющие, то в ванне все время повышается процент легкоплавких компонентов. Процесс кристаллизации заканчивается при более низкой температуре, чем начался.

Вы уже знаете, что кристаллы в обычной сварочной ванне сходятся к середине шва, следовательно, элементы в шве «вынуждены» распределиться неравномерно: ближе к границе сплавления с основным металлом — более тугоплавкие, в середине — легкоплавкие. От состава сплава зависят и его свойства. Иногда такие важные свойства, как механическая прочность и коррозионная стойкость, могут измениться резко, скачком из-за ничтожно малого изменения состава. Поэтому нельзя допустить произвольное распределение элементов по шву при сварке ответственных конструкций. Неблагоприятные концентрации даже на одном участке могут вывести из строя все изделие. Вот и приходится ученым рассчитывать и исследовать локальный состав ванны и шва, учиться управлять характером кристаллизации. Некоторые элементы способны «перераспределяться» уже в твердом кристалле. Например, при сварке сталей углерод, обладающий большой диффузионной подвижностью (особенно при высоких тем-



пературах), успевает выровнять свою концентрацию за время остывания шва. Встречаются элементы, которые, не дожидаясь, пока к ним подойдет фронт кристаллизации, сами начинают кристаллизоваться и образовывать собственные дендриты в тех частях ванны, где им еще и быть-то не положено. Часто такие элементы — модификаторы применяют специально для измельчения структуры. Например, при сварке алюминиевых сплавов модификаторами служат титан и цирконий. Есть элементы, которые не дают возможности разрастаться кристаллам, обволакивают каждый из них тончайшим слоем, а в расплаве в это время зарождаются и разрастаются новые дендриты.

Нарушает законы кристаллизации и механическое воздействие. Например, с помощью ультразвука можно создать дополнительные центры и измельчить структуру. Воздействуют на ванну и источники тепла, и условия теплоотвода. И конечно, на форму и размеры кристаллитов влияют условия нагрева и теплоотвода.

Виды сварных соединений и типы швов. В реальных производственных условиях сварочная ванна может занимать различные положения в пространстве. Посмотрите на рисунок: сварка может производиться в нижнем положении (а, е), в потолочном положении (ж), на вертикальной или наклонной плоскости (з, и).

Очевидно, что лучше иметь дело с нижними швами. Однако не всякое изделие можно поворачивать в удобное для сварки положение. При сварке кораблей, каркасов зданий, стыков трубопроводов очень часто ванна оказывается в перевернутом положении.

От взаимного расположения свариваемых элементов различают следующие виды соединений: Стыковое соединение (а). Образовать его могут элементы одинаковой или различной толщины. Швы при таком соединении называют стыковыми. При сварке кромки тонких листов иногда предварительно отбортовывают (б). При тавровом (в) и угловом (г) соединениях элементы собираются в виде буквы «т» или «г». Угол между полкой и стенкой может быть прямым, а может и отличаться от 90° . И сочетание толщин может быть различным. Швы при этом соединении называют угловыми.

При нахлесточном соединении (д) один лист накладывается на другой. Выполнять такое соединение можно угловым швом, проваривая одну кромку; можно точечными швами с проплавлением верхнего листа (дугой, электронным лучом) или с образованием точек или сплошного шва внутри, между листами при контактной, холодной и других способах сварки.

Обычно выбор вида сварных соединений и вида шва зависит от конструкции изделия. А уже в зависимости от вида шва, толщины соединения, от свойств металла, наличия оборудования и других условий устанавливают приемы и режимы сварки.

Конструкторам, проектирующим изделие, и технологам, разрабатывающим технологический процесс изготовления изделия, приходится учитывать множество различных факторов, находить оптимальные решения.

Сварка «портит» металл

Ступени улучшения. До конца XIX в. сварке, несмотря на превосходство в маневренности и производительности, не удалось заметно потеснить клепку. При помощи клепки продолжали скреплять обшивку корабля, стенки и днища котлов, балки мостов и башен и др. Сварке оставались второстепенные металлоконструкции и неотчетливые изделия. Новый технологический процесс не всегда обеспечивал хорошее качество соединений. В то время сварку поддерживали только отдельные энтузиасты. Удачно найденные решения внедрялись в практику, развивались, служили очередной ступенькой для дальнейшего подъема сварочного производства.

Среди таких ступеней была и идея шведского инженера О. Кельберга. В 1907 г. он предложил покрывать металлические плавящиеся электроды термостойкими неэлектропроводными материалами. И хотя тугоплавкое покрытие электродов нужно было Кельбергу, чтобы выполнить сварку в потолочном положении (предотвратить стекание электродного металла), оказалось, что оно в некоторой степени защищает расплавленный металл от кислорода и азота воздуха. В 1917 г. американские ученые О. Андрус и Д. Стреса изобрели новый электрод. Его стальной стержень был обернут полоской бумаги, приклеенной силикатом натрия — жидким стеклом. Бумага стала источником дыма, оттеснявшего воздух из зоны сварки, подобно тому как для

этой же цели Н. Бенардос специально подавал газ. Обнаружилось еще одно интересное свойство новой обмазки — дуга возбуждалась сразу, с первого касания и не гасла, как обычно, при незначительном удлинении. Сказалось присутствие в обмазке натрия. Для сварщиков это было очень важно: ведь им в течение нескольких часов приходилось, держа на весу руку с электродом, сохранять постоянным маленький зазор (в несколько миллиметров) между концом плавящегося электрода и сварочной ванной.

Совместными усилиями изобретателей многих стран: ученых, инженеров, рабочих — велись исследования с целью улучшить качество металла шва при ручной электродуговой сварке. К концу 20-х гг. XX в. электроды с обмазкой уже содержали специальные газообразующие вещества (в основном органические), оттесняющие воздух из зоны сварки; легирующие вещества (в основном ферросплавы), которые улучшали состав и структуру металла шва; шлакообразующие минералы (песок, окись титана и др.), участвующие в легировании и прикрывающие кристаллизующуюся ванну и остывающий шов; и, наконец, стабилизирующие вещества с низким потенциалом ионизации. Обмазку со специальными технологическими свойствами можно было получать, изменяя состав компонентов, например с повышенной жидкотекучестью, легкоплавкостью и другими необходимыми свойствами для успешной сварки в различных условиях.

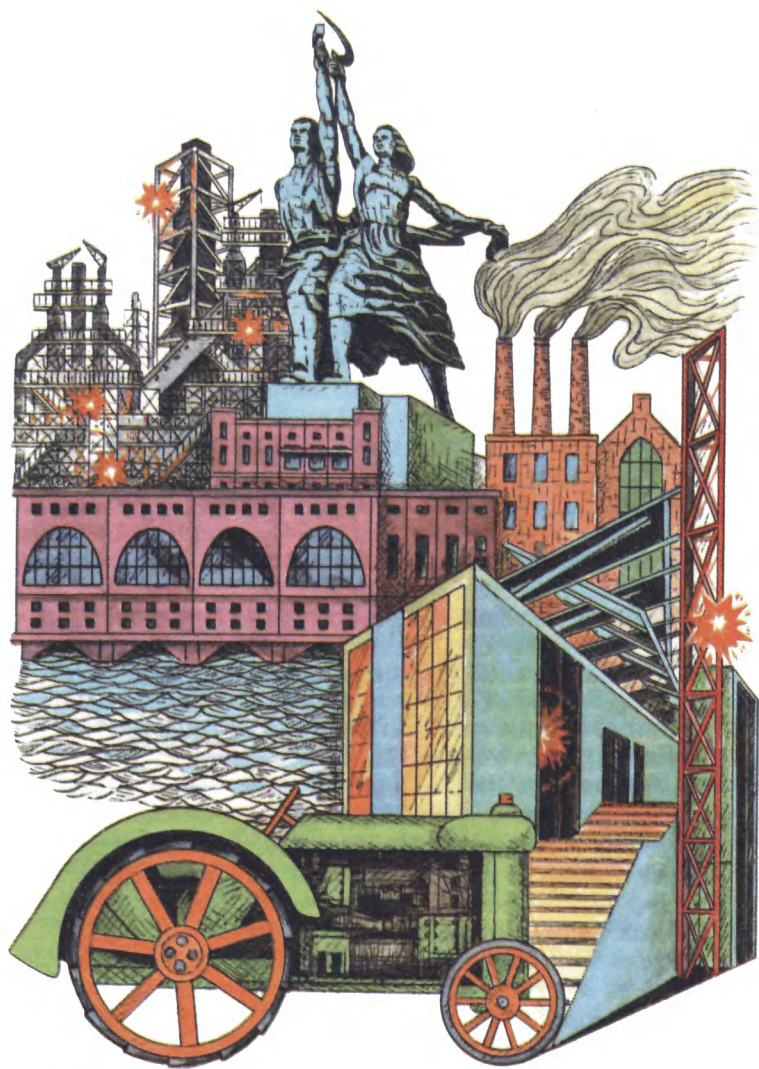
Успехи и неудачи. В 20-х гг. XX в. крупнейшие по тем временам сварные конструкции (баки, котлы, фермы, баржи) были изготовлены в нашей стране на Дальнем Востоке под руководством В. П. Вологодина, организовавшего технический центр по пропаганде, распространению и внедрению сварки.

В судьбе сварки особую роль сыграл энтузиазм

В наше время сварные швы соединяют сотни тысяч заводских конструкций во многих странах мира.



комсомольцев-строителей Кузнецкого (Кузбасс) и Магнитогорского металлургических комбинатов на Урале. Это были важнейшие стройки молодого Советского государства. Чтобы сохранить экономическую независимость, нужно было поднять уровень производства металла. Темпы строительства превышали расчетные, и трудно было смириться с тем, что многочисленные воздухопроводы и газопроводы необходимо клепать, как это предлагали консультанты из американских фирм, ссылаясь на опыт индустриального строительства в США. Комсомольцев Магнитогорского металлургического комбината не смутило отсутствие мирового опыта и отказ консультантов гарантировать безаварийную работу домов. Они обратились к главному инженеру строительства И. П. Бардину, и он разрешил сварку опытного



образца. Гидравлические испытания показали — сварная труба прочнее традиционной клепаной! Сварка значительно сократила затраты времени на монтажные работы.

Шли 30-е годы. Котлы и корабли, каркасы зданий и детали мостов, автомобили и вагоны... — диапазон сварных конструкций пополнялся, и казалось, что ничто уже не прервет наступления сварки. Но однажды... Трудно назвать точную дату — различные аварии сварных (да и клепаных) конструкций изредка случались и раньше. Но в 1938—1939 гг. в Западной Европе неожиданно обрушилось несколько мостов. Балки мостов были сварными. В этот период тысячи железнодорожных вагонов в СССР и других странах были сняты с эксплуатации из-за трещин в сварных рамах и тележках. Начались всесторонние исследования. Что же установили ученые?

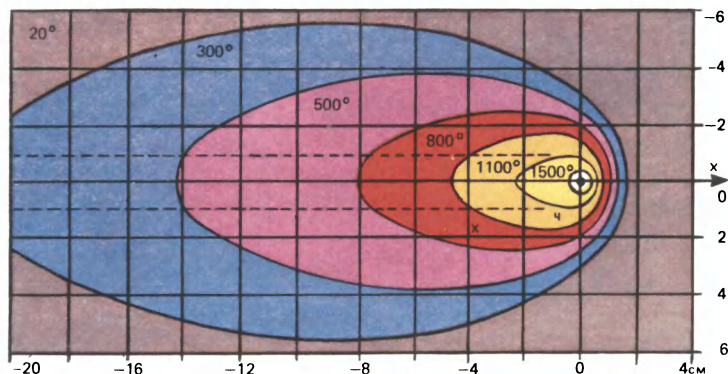
Подвижные температурные поля. Во время сварки теплота, выделяемая сварочным источником нагрева, тратится не только на расплавление металла ванны. Она нагревает также шлаки и газы, окружающие ванну. Кроме того, вместе с ванной нагревается и само изделие. При этом нагревается оно неравномерно: рядом, на границе с ванной, — почти до температуры плавления, а чем дальше от ванны, тем температура ниже. Температура при движении источника нагрева меняется непрерывно: на участках изделия, ближайших к ванне, она сначала резко возрастает, потом снижается. Иная картина в местах, отдаленных от зоны сварки: тепло туда доходит с опозданием, температура плавно повышается и медленно понижается в результате рассеивания тепла в окружающую среду.

В результате неравномерного нагрева свариваемые изделия коробятся — деформируются, в метал-

Нагрев свариваемого изделия характеризуется изотермами — линиями, соединяющими точки с одинаковыми температурными данными.

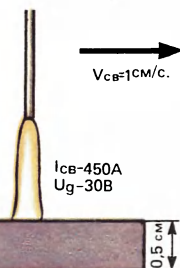
Изотермы обычно можно построить по данным, которые получены непосредственными измерениями при помощи термопар или рассчитаны по формулам. Мож-

но определить температуру нагрева любого участка пластины, подставив в уравнение ее координаты.

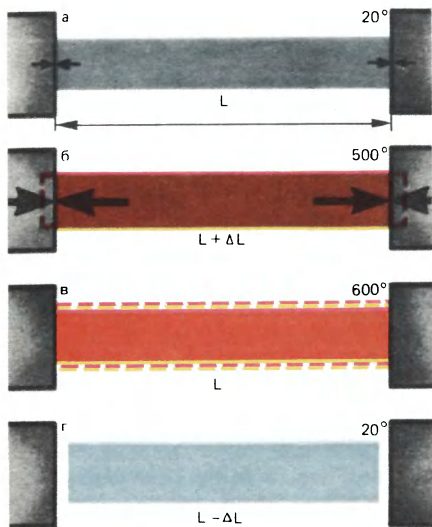


$$T = \frac{q}{2\pi\lambda\delta} \left[\frac{V_x}{2a} K \left(\frac{V_r}{2a} \sqrt{1 + \frac{4ba}{V^2}} \right) \right]$$

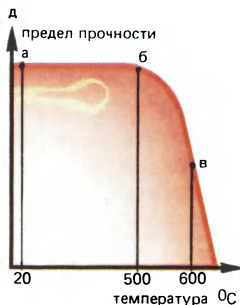
$a = 0,1 \text{ см}^2/\text{с.}$
 сталь $\lambda = 0,4 \text{ Дж/см. с. град}$
 $v = 2,8 \cdot 10^{-3} \text{ 1/с.}$



В качестве примера, объясняющего механизм укорачивания шва, взят брусок, равномерно нагреваемый по всей длине. Поскольку удлинению препятствуют неподвижные стенки, в бруске возникают напряжения



сжатия. С повышением температуры сопротивление металла сжатию уменьшается. При достижении критической температуры брусок не выдержит сжатия и сомнется на величину $\Delta\alpha$. Усилие, вызванное стремлением удлинить, и внутренние напряжения сжатия сразу исчезнут. При остывании брусок станет короче, чем был в начале эксперимента, на величину $\Delta\alpha$.



ле появляются внутренние напряжения. Очень многие сплавы железа и цветных металлов изменяют свою прочность и пластичность при нагреве выше определенных температур. К тому же часто эти свойства зависят и от скорости охлаждения (как и при закалке сталей). Вот почему так важно знать температурные изменения на различных участках свариваемого изделия. Этими вопросами занимается особый раздел сварочной науки. Наиболее важной

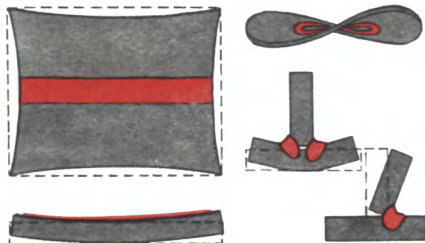
задачей этого раздела являются расчеты температурных полей. Ведущая роль в разработке тепловых основ сварки принадлежит советским ученым, в первую очередь академику Н. Н. Рыкалину.

Сила, разрывающая стальные балки. Что происходит с металлом при нагреве, знают все — он расширяется. А если кусочек металла зажат в тисках так, что ему некуда расширяться?

Именно в таком положении находятся при сварке участки шва и околошовной зоны. Рассмотрим, как чувствует себя отдельный участок. Вырежем мысленно брусок так, чтобы шов пришелся на середину его длины. Отвлечемся от температурных полей и условно посчитаем, что дуга будет нагревать брусок равномерно до 600°C . И, чтобы приблизить модель к реальным условиям (в которых участки металла связаны между собой), положим брусок между прочными неподвижными стенками. Ведь в реальных изделиях участки металла связаны между собой и не имеют возможности перемещаться отдельно.

При нагреве металл будет стремиться удлинить-ся. Однако нашей модели (да и реальному металлу на участке сварки) удлиняться некуда — мешают стенки, и металл начинает «чувствовать» сжимающее усилие от распираемых им стенок (б). В то же время нагретый металл становится более пластичным и, поддавшись сжатию, сминается (в). Он уже не распирает стенки и, когда начинает остывать, укорачивается на столько, на сколько не смог удлиниться (г). Если стенки не позволяют бруску свободно сокращаться, если они его держат, то в нем возникнут напряжения растяжения. Так происходит и в реальных условиях сварки, потому что те участки изделия, которые не были нагреты до пластического состояния и сохраняли свою жесткость,

«Шов стягивает металл». Прямоугольные пластины после сварки стягиваются по середине. В других соединениях тоже происходит деформация.



препятствуют укорачиванию металла в околошовной зоне. Но и околошовные участки не остаются в долгу — они стремятся сжать расположенный рядом с ними металл. Эта сложная картина деформаций и внутренних напряжений осложняется при сварке пересекающихся швов, при закреплении заготовок перед сваркой, при предварительном подогреве и охлаждении. Сваренные конструкции изгибаются, коробятся, вспучиваются еще задолго до того, как начнут эксплуатироваться и примут на себя рабочую нагрузку. Сварочные напряжения растяжения или сжатия суммируются с напряжениями от внешней нагрузки.

Но сварщики не ждут, когда деформируется, а тем более разрушится изделие. Специалисты заранее могут рассчитать напряжения и деформации, разработать рекомендации по борьбе с ними.

Горячие трещины. Теперь вы уже знаете: металл в зоне сварки и сам сварной шов при остывании, как правило, стремится укоротиться, и если на каком-то участке (там, где очень жесткая конструкция) это невозможно, то возникают внутренние растягивающие напряжения. Помните, как кристаллизуется ванна? В ней существуют одновременно твердая и жидкая фазы. Жидкая фаза «оттесняется» к середине, пополняется легкоплавкими компонентами. Но вот наступает момент, когда твердые

кристаллы почти смыкаются и между ними остаются тонкие, иногда уже разрозненные прослойки жидкости. Такой двухфазный металл имеет минимальную пластичность. Стоит только возникнуть растягивающим напряжениям, и кристаллиты, еще не связанные между собой, начинают расходиться, а жидкости в прослойках не хватает для того, чтобы заполнить появившуюся брешь.

Невооруженным глазом процесс образования кристаллизационных трещин не всегда и заметен, но об опасных последствиях его часто узнает весь мир. Еще менее заметен процесс образования трещин, возникающих во время перестройки границ при грануляции уже затвердевшего металла. Трещины обоих типов называют **горячими**, потому что возникают они в нагретом металле.

Руководствуясь классической методикой научного решения технической проблемы (исследование процесса — установление причины — поиск мер борьбы), можем подвести итог второму этапу и отметить: причин, по крайней мере, две: свойства металла и непомерные напряжения во время сварки. Отсюда и способы исключения горячих трещин: выбор металла с повышенной стойкостью против дефектов и разработка технологических приемов для исключения неблагоприятных нагрузок.

Эти теоретические научные рекомендации в чистом виде при внедрении в производство приходится увязывать с множеством других требований, условий, рекомендаций, часто взаимоисключающих друг друга, например выбор металла. Для облегчения выбора есть даже специальная характеристика — **технологическая прочность металла** при сварке — способность металла шва или околошовной зоны претерпевать без разрушения упругопластические деформации при высоких температурах в процессе сварки. Допустим, необходимо построить

стальной мост. Естественно, вы решаете выбрать металл с хорошей технологической прочностью. Вам известно, что при высоком содержании серы в стали можно исключить горячие трещины. Но не спешите рекомендовать металл и тем более браться за сварку. Впрочем, сварка пройдет хорошо, но, когда шов остынет, прочность его окажется настолько низкой, что балки моста могут не выдержать и собственного веса. Сварить будет легко, а удовлетворить эксплуатационные требования не удастся. Правда, во многих случаях принять или отклонить какой-либо состав бывает еще сложнее. Сплавы содержат много примесей, и отрицательное влияние одного элемента может компенсироваться положительным влиянием другого, да и с изменением количества одного и того же элемента свойства сплава могут резко изменяться.

Не проще обстоят дела и со второй рекомендацией — разработкой технологических приемов. Так, например, в швах малой ширины с глубоким проплавлением скорее образуется трещина, чем в широких швах, но в то же время при сварке широких швов расходуется больше энергии и присадочного металла, возникают максимальные деформации и напряжения, увеличивается зона разупрочнения.

Для того чтобы облегчить выбор металла и технологии, ученые предложили специальную характеристику — **свариваемость**.

В понятие свариваемости входит и то, как ведет себя металл во время сварки и после нее: его надежность в эксплуатации и экономичность сварки.

Оценивают свариваемость по результатам специальных испытаний. К сожалению, до сих пор ученым не удастся прийти к единой методике испытаний и разработать единые количественные показатели — слишком сложна эта комплексная характеристика. Да и задачи испытаний бывают разные: определе-

ние свойств нового конструкционного сплава, пригодности новой технологии сборки или сварки, исследование свойств нового сварочного материала.

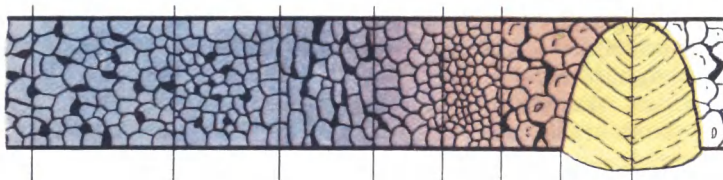
Поры и включения. Кристаллизация, которую мы описали, хотя и кончается иногда горячими трещинами, протекает все же неплохо. А бывает, что в период кристаллизации вдруг начинается сильное газообразование — результат взаимодействия различных компонентов, оказавшихся в ванне, и среды, окружающей ванну. И к этому еще добавляется способность металлов хорошо растворять газы в жидком состоянии и плохо — в твердом. Причем переход от «хорошо» к «плохо» часто происходит скачком. Например, растворимость водорода и азота — газов, которые легко могут попасть в металл из воздуха, и паров воды, в железе при температуре около 1500°C сразу изменяется в 3—4 раза. Пузырьки газа выталкиваются из металла как раз в зоне кристаллизации. Но, когда скорость кристаллизации большая, пузырек или часть его может остаться между ветвями дендрита, и тогда дефект неизбежен.

Бурное выделение газов еще до кристаллизации — это результат реакций, а реакции — это другой раздел сварочной науки — **металлургии сварки**. Metallургия учит: в недостаточно раскисленном металле может появиться газ — окись углерода. Чтобы уменьшить выделение газа, вводят «в бой» раскислители (титан, кремний, марганец и др.), которые перехватывают кислород, образуют окиси в виде шлаков, а не газов.

Шлаки, как вы уже знаете, тоже необходимо удалить из металла шва. Но иногда, особенно при нарушениях режима сварки, при многослойной сварке, шлаковые частицы все же застывают в затвердевающем металле. Разные по размерам и форме, они

Строение зоны термического влияния.

Рядом со швом находится зона оплавления, за ней размещаются зоны с различными структурными изменениями.

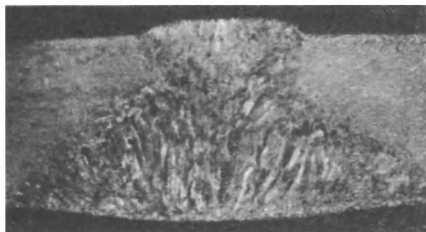


по-разному уменьшают прочность металла шва. Наиболее опасные остроугольные.

Процесс образования шва не проходит бесследно и для околошовного металла. После сварки остаются деформации и напряжения, изменяются и свойства металла.

Большинство металлов, применяемых в технике, строительстве, быту, — это сплавы основного металла с полезными и вредными примесями. Среди металлов большую группу составляют конструкционные материалы, которые применяются для деталей машин и сооружений. Такие материалы воспринимают силовые нагрузки и поэтому должны обладать определенным комплексом механических свойств, и в первую очередь пластичностью и прочностью. Металлы приобретают эти свойства в результате механической и термической обработки после литья, заковки, прокатки, штамповки и т. д. И вот во время сварки им снова приходится подвергаться термическому воздействию. В результате «ломаются» структуры, изменяются свойства металлов.

Изменения эти возникают на различных участках околошовной зоны по-разному и зависят во многом от термических циклов. Металл в зоне нагрева



Форма шва, структура металла видны на отшлифованном и протравленном образцах сварного соединения.

выше критических температур и вблизи этой зоны может подвергнуться закалке, раскристаллизации, старению и т. д.

«Незапланированные» изменения свойств металла на отдельных участках нежелательны и могут привести к самым неожиданным последствиям. Сварщики должны уметь определять, какие структурные превращения произойдут вблизи шва, и учитывать изменения свойств металла.

Холодные трещины в сварных соединениях. Сварочные напряжения, структурные превращения, перераспределения элементов металла шва и околошовной зоны иногда могут вызвать серьезный дефект сварного соединения — **холодную трещину**. Холодные трещины в отличие от горячих, возникающих в процессе кристаллизации, образуются при совсем невысоких температурах, даже после остывания, а иногда и через несколько дней после сварки.

Правда, начальные, внешне незаметные трещины появляются все же в первые часы после сварки, а потом, когда сварное изделие начинает нагружаться или попадает в неблагоприятные температурные условия, трещины «взрываются» с сильным звуком и распространяются на все сечения соединения. Изделия разваливаются.

Многолетние исследования понадобились для того, чтобы выяснить только основные закономерности

образования холодных трещин. Было выдвинуто и проверено несколько гипотез, некоторые из них разрабатываются до сих пор (водородная, закалочная).

Как же узнать, возникнут или нет холодные трещины при сварке какой-либо конструкции?

Ученые разработали методы оценки стойкости сварных соединений против образования трещин. Во время сварки образцов искусственно создаются условия, способствующие образованию трещин. Обычно образец закрепляют на жестком основании — плите большой толщины. А после сварки определяют, не появились ли трещины.

Более точные данные можно получить, если подвергать сварные образцы растяжению, кручению, изгибу на специальных испытательных машинах. В этом случае нагрузку можно задать с учетом реальных условий работы сварной конструкции.

Сварка не должна портить металл. Тяжело приходится металлу во время сварки. Много неприятностей подстерегает его, и кажется, что невозможно уберечься от пор, трещин, деформаций, напряжений. Но посмотрите — вас окружают металлические конструкции. А где металл, там и сварка. Транспорт и здания, мосты и башни, турбины и резервуары... Они надежно служат людям многие годы, если **правильно сконструированы** и если **качественно сварены**. Необходимость строго соблюдать эти два условия доказал известный ученый-мостостроитель академик АН УССР Е. О. Патон, основатель Института электросварки Академии наук УССР.

Когда в начале 30-х гг. Е. О. Патон занялся сваркой, то первые свои исследования в этой области он посвятил надежности сварных конструкций. Определив, что нельзя слепо копировать клепаные узлы, пусть даже самые удачные, Е. О. Патон за-

ложил основы конструирования рациональных сварных промышленных и гражданских сооружений, а также транспортных средств.

Автоматизация сварки

Долгое время сварка остается ручной. Такой метод сварки не позволяет ей войти в поточную линию, ускорить сборку и монтаж изделий, гарантировать безупречное качество соединений. Автоматизировать сварку решает коллектив Института электросварки Академии наук СССР, которым руководил тогда Е. О. Патон. Институт ставит задачу — создать аппараты, способные превзойти ручную сварку как по скорости, так и по качеству сварного шва.

Из всех известных тогда видов сварки наилучшее качество обеспечивала сварка штучными покрытыми электродами, которые сварщик по мере оплавления подавал в зону сварки вручную. Решено было отдельные короткие электроды заменить электродной проволокой большой длины, покрытой обмазкой. Тогда легко было бы механизировать подачу электрода из мотка проволоки, а сам подающий механизм перемещать вдоль шва. Но длина штучных электродов ограничена (до полуметра) не только потому, что так удобно сварщику. Дело в том, что обмазка неэлектропроводна и ток к электроду подводится с конца, который оставляют непокрытым. Ток, проходя вдоль по электроду в соответствии с законом Джоуля — Ленца, нагревает металлический стержень тем сильнее, чем больше его длина. А нагревание до высокой температуры недопустимо — отваливается электродное покрытие. Увеличить площадь поперечного сечения стержня (чтобы уменьшить количество выделяющегося тепла) тоже нельзя, потому что для устойчивого горения дуги и равномерного плавления

электрода необходима определенная плотность тока на конце электрода. Одним словом, законы природы требовали, чтобы ток к электродной проволоке подводился в месте, расположенном поближе к дуге. Чем ближе, тем бóльшую плотность тока (т. е. отношение силы тока к площади сечения электрода) можно допустить без перегрева электрода. А чем больше плотность, тем больше скорость плавления электрода, тем бóльшую толщину можно проплавить, тем выше производительность сварки.

Но как подвести ток к покрытому электроду неограниченной длины?

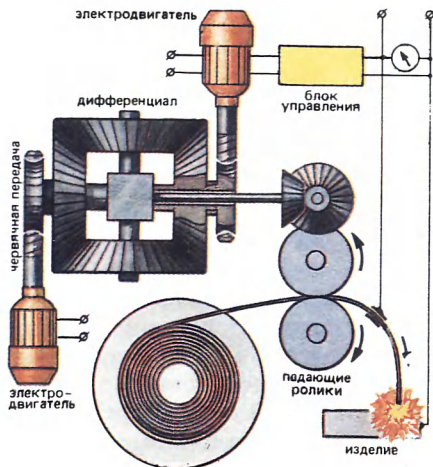
Одновременно с поисковыми работами по автоматизации процесса сварки были развернуты научные работы по исследованию энергетических характеристик дуги и металлургических процессов в сварочной ванне.

Токоподвод удалось «организовать». В институте было разработано несколько типов проволоки, покрытой неэлектропроводной обмазкой и в то же время способной подключиться к сварочной электроцепи через свою поверхность. Наиболее подходящей оказалась «крестовая» проволока, на поверхности которой оставались непокрытые обмазкой полосы. Через них и подводился ток от отдельной щетки, расположенной в направляющем мундштуке.

Сварочная головка с зависимой скоростью подачи. Теперь вместо короткого штучного электрода можно было использовать моток проволоки и работать длительное время без перезарядки. Для подачи электрода в зону сварки был сконструирован специальный подающий механизм. Его вместе с токопроводящей системой и катушкой с проволокой устанавливали на тележку, которая и перемещала сварочную головку вдоль линии шва.

Механическая и электрическая части сварочной

Схема сварочной головки с зависимой скоростью подачи электродной проволоки.



головки должны были сохранить постоянство длины дуги. Электрод подавался с точно такой скоростью, с какой оплаивался его конец. А скорость плавления электрода зависит от множества факторов. Главный из них — сила тока, точнее — **плотность тока**. Немаловажное значение имеет также состав окружающей среды, температура плавления электрода и ванны. Эти и другие факторы опытный сварщик учитывает зачастую интуитивно и старается поддерживать длину дуги в пределах нормы.

Выбрать и сохранить необходимую длину дуги, управлять полетом капель, отрывающихся с конца электрода, получить необходимый развар кромок изделия, длину и глубину ванны — для того чтобы выполнить эти задачи, от сварщика требуются и знания и природное дарование.

Под руководством Е. О. Патона была создана сварочная головка, которая смогла воспроизвести движения опытного сварщика. Механизм не только регулировал скорость подачи и скорость плавления

электрода, но и реагировал на рельеф свариваемой поверхности, на то, что дуга внезапно удлинялась или укорачивалась. Головка состоит из четырех конических зубчатых шестерен. Две шестерни ведущие, имеют независимые приводы от отдельных двигателей (через червячные пары). А две другие шестерни — сателлиты, свободно насажены на цапфы крестовины основного валика. На конце валика закреплен ведущий ролик. Ведущий и холостой ролики подают электродную проволоку.

Таким образом, сварочная техника получила автоматическую сварочную головку с обратной связью и электрод теоретически бесконечной длины с надежной возможностью токопровода. Однако...

На пути к сварке под флюсом. В 1939 г. передовые сварщики почти достигли такой же скорости сварки, как при автоматической сварке покрытой электродной проволокой.

Узнав о новейших достижениях сварщиков-стахановцев, Е. О. Патон сумел верно оценить создавшееся положение. Он понимал, что, на каком бы уровне ни улучшать старый, пусть самый удачный способ, ручники всегда будут «поджимать». И только новые качественные изменения, внесенные в процесс автоматической сварки, могут дать желаемые результаты. При этом необходимо отказаться от электродного покрытия, которое мешало увеличить плотность тока и тем самым повысить скорость плавления электрода.

Сейчас, когда известны результаты поиска, когда в основе наиболее распространенных способов сварки лежит идея голого электрода, может создаться впечатление, что эта идея была очевидной. Однако сам по себе отказ от покрытия приводил к отрицательным результатам: при этом ухудшалось качество шва. При плохой защите зоны сварки воздух прони-

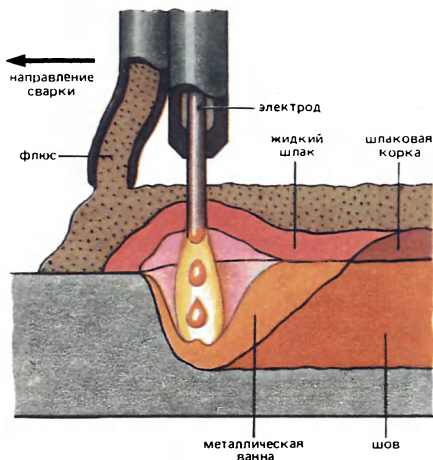
кает к сварочной ванне. Образовавшиеся при этом окислы и нитриды железа попадают в металл шва, делают его хрупким. В результате резко уменьшается пластичность, снижается сопротивление удару, образуются трещины.

Изобретатели дуговой сварки Н. Н. Бенардос и Н. Г. Славянов предложили несколько способов защиты сварочной ванны. Наиболее эффективным из них был способ Н. Г. Славянова. Отдельные участки будущего шва предварительно заформовывали и заливали расплавленным шлаком. Практически этот способ годился только для ремонта — наплавки металла на отдельные участки изделия. Увеличение же мощности дуги все равно оставалось проблемой, потому что конец электрода и примыкающая к нему часть дуги не были защищены от влияния воздуха. Электрод плавился, жидкий металл разбрызгивался, и тем сильнее, чем выше была плотность тока.

И все же Е. О. Патон приходит к выводу, что необходимо совершенствовать сварку, защитив ванну, а если удастся, и электроды сыпучими веществами — флюсами. Причем флюсы должны быть активными, подобно обмазке штучных электродов.

В то время науки, известной теперь как металлургия сварки, еще не существовало. Правда, в Институте электросварки уже несколько лет исследовали различные компоненты обмазок и составы электродной проволоки. Но флюсы, по составу сходные с составом лучших обмазок электродов, не давали хорошего качества металла. Очевидно, сварка под флюсом протекала в иных условиях. Но в каких? Что происходит под толстым слоем стекловидных зерен размером с рисовые или пшеничные зерна?

Задача исследовать природу тысячеградусного сильноточного процесса была чрезвычайно сложной. Не было даже единого мнения о том, горит ли под флюсом дуга. В США сотрудники фирмы Линде,



При сварке под флюсом используют непокрытую электродную проволоку. Дуга расплавляет не только кромки изделия и проволоку, но и некоторое количество флюса. Расплавленный флюс (шлак) защищает зону сварки. После остывания шлаковая корочка легко отделяется от шва.

также разрабатывавшие сварку под флюсом, считали, что тепло для расплавления электрода и свариваемых кромок выделяется при прохождении тока через расплавленный, ставший электропроводимым флюс.

Е. О. Патон, учитывая некоторые наблюдения, в том числе наличие глубокого кратера — углубления в конце шва, возникающего обычно из-за давления дуги на ванну, придерживался «дуговой» гипотезы. Забегая вперед, скажем, что в 1943 г. в Институте электросварки было проведено осциллографирование процесса и экспериментально доказано существование дуги при сварке под флюсом. Разработчики получили надежные теоретические предпосылки. Позже дугу удалось увидеть через кварцевую трубку.

В 1939—1940 гг. бригада Института электросварки совместно с заводскими инженерами уже работала над автоматической сваркой брони. Много сил и энергии было потрачено, чтобы решить эту задачу, но получить положительные результаты так и не

удалось — в броневах швах возникали трещины. Качество швов при медленной ручной дуговой сварке было лучше.

Флюс в этом способе защищает расплавленный металл электрода и ванны от воздуха; концентрирует тепло в зоне сварки; замедляет остывание ванны, позволяя попавшим в нее газам выйти наружу; облегчает ионизацию дугового промежутка, обеспечивая стабильность процесса; легирует металл шва дополнительными элементами; предотвращает выгорание полезных примесей.

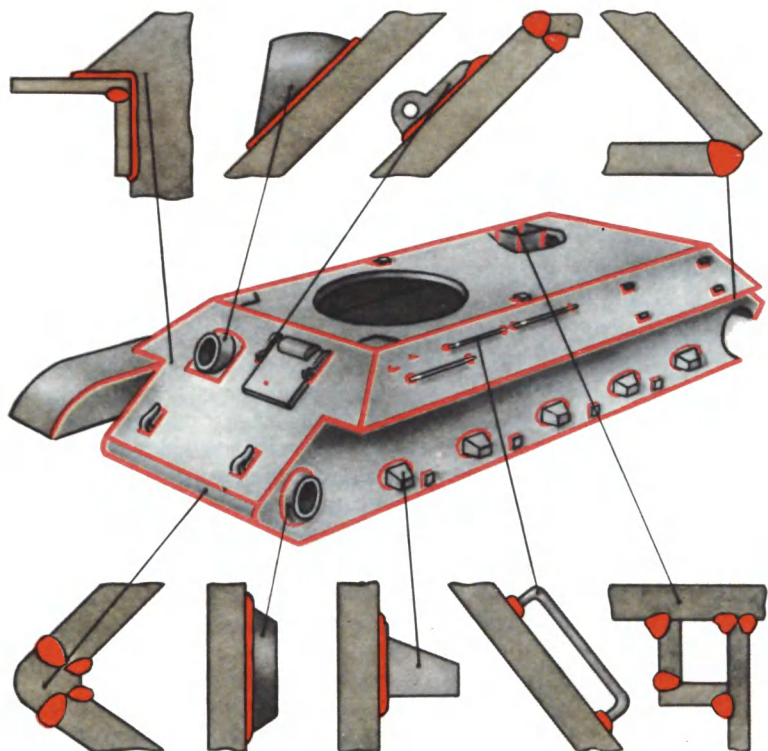
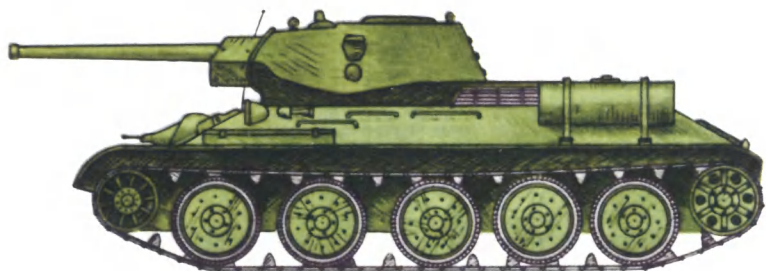
Но все эти особенности будут раскрыты позже, а в то время, к началу 1940 г., был разработан состав первого промышленного плавленного флюса для сварки плавящимся стальным электродом. Одновременно в институте закончили проектирование и изготовили специальную сварочную головку-автомат, способный кроме обычных операций подавать флюс в зону сварки и собирать его сразу же после сварки. Для различных типов сталей было предложено несколько марок электродной проволоки.

С конца 1940 г. в нашей стране приступили к широкому внедрению отечественного метода скоростной автоматической сварки. Руководство всеми работами было возложено на Е. О. Патона.

Необходимо было разработать для изделий рабочие чертежи автосварочных установок, изготовить их, смонтировать и отладить; обеспечить заводы флюсом, электродной проволокой, помочь освоить технологию сварки.

Победа автоматической сварки

В начале 1941 г. автоматическая сварка уже внедрялась на 20 крупнейших предприятиях страны. Только сварка броневых сталей «застряла» в лаборато-



Танк — сложное инженерное сооружение, изготавливаемое путем сварки угловых и сты-

ковых соединений в различных пространственных положениях.

рии. Танковая броня не хотела покоряться новому способу сварки.

Дуга сваривает танки. Танкостроители поначалу не особенно доверяли сварке — этому слишком быстрому способу соединения металлов и считали клепку более надежным и достаточно производительным технологическим процессом.

Однако в 1937 г. корпус танка Т-26 был изготовлен не клепкой, а ручной дуговой сваркой. В 1939 г. во время войны с белофиннами обнаружилась слабость брони клепаных танков Т-28. И тогда к корпусам и башням уже готовых к отправке на фронт машин были приварены дополнительные броневые листы толщиной 20—50 мм.

Но главной заботой сварщиков стали новые танки. 19 декабря 1939 г. успешно прошел испытания и был рекомендован в производство средний танк Т-34, оказавшийся самым лучшим из танков, участвовавших во второй мировой войне.

Успех применения той или иной конструкции танка (впрочем, как и других машин широкого потребления) в значительной степени зависит от приспособленности к массовому производству, от надежности технологии изготовления. При массовом производстве недопустимы часто повторяющийся брак, перерасход энергии и материалов, завышенная трудоемкость. Ведь даже малейший недостаток, незаметное на первый взгляд на единичной машине упущение, умноженное на большое количество машин, обернется довольно значительными потерями, которые особенно ощутимы в военное время.

Суровые условия войны требовали десятки тысяч

танков. Препятствием к увеличению выпуска танков стали бронекорпуса, которые необходимо было сваривать. Чтобы выполнить эту работу, нужны были сотни, тысячи высококвалифицированных сварщиков. А вместе с тем даже в мирное время опытных сварщиков не хватало. Подготовить в кратчайший срок необходимое количество специалистов было немыслимо. Тем более что фронт нуждался в людях не менее, чем промышленность.

Из создавшегося положения был только один выход — автоматическая сварка. И в это трудное время Е. О. Патон начал разработку технологии автоматической сварки брони под флюсом с электродной проволокой.

Сотрудники Института электросварки работали по 12—16 ч в сутки. Сменяя друг друга, сваривали куски броневой стали, резали образцы, шлифовали, изучали под микроскопом, измельчали минералы, плавил флюсы, опять варили... Эксперимент за экспериментом, флюс за флюсом, режим за режимом... Но трещинки, очень маленькие, часто заметные только в микроскоп, раскалывали монолит шва, предвещая неприятности при ударе снаряда. Основная задача, которая стояла перед коллективом института, — выяснить причину растрескивания шва и разработать технологию сварки брони.

Броню непревзойденного качества смогли создать советские металлурги. Но те же химические элементы, что обеспечивали металлу хорошую противоснарядную стойкость и живучесть, делали его чувствительным к нагреву, ухудшали свариваемость. Однако сварщики обязаны были принять броню целиком, со всеми ее свойствами — хорошими и плохими. Их задача была связать броневые плиты так, чтобы танки, корабли, самоходные артиллерийские установки и другие сварные конструкции обладали наивысшими боевыми качествами.

Мягкий шов. Лабораторные исследования все же увенчались успехом — была найдена основная причина образования трещин. Оказалось, что высокая проплавливающая способность дуги, горящей под флюсом, необходимая для повышения производительности процесса, имеет и отрицательную сторону. В сварочную ванну попадало значительное количество основного металла. Вместе с тем в ванну переходил и углерод. «Объединяясь» с легирующими примесями, углерод делал металл шва склонным к образованию трещин.

Для решения этой проблемы была предложена оригинальная идея — предварительно уложить в зазор между кромками малоуглеродистую проволоку и затратить часть тепла на ее плавление. Развар кромок уменьшился, и в ванне снизилось содержание углерода.

Оставалось ответить на вопросы: как будут чувствовать себя танки в бою, при попадании снарядов прямо в шов с уменьшенным содержанием углерода? Можно ли допустить в «работу» танки, сваренные швом более мягким и менее твердым, чем броня?

Е. О. Патон до испытания ответил на эти вопросы: поскольку диаметр снаряда больше ширины шва, то снаряд, попавший точно в шов, все равно встретится с броней и заклинитесь между кромками в мягком шве. Бездефектный вязкий шов должен хорошо принимать на себя ударные нагрузки при танке. На полигоне подтвердилось: ученый прав.

На испытательный полигон доставили корпус танка, один борт которого был сварен старым способом — вручную, а другой — автоматом под флюсом. От бронебойных и фугасных снарядов «ручные» швы быстро разрушались. «Автоматные» швы продолжали держать изуродованные броневые плиты после жесточайшего обстрела, немыслимого в реальных условиях.

Танковый конвейер. Технология автоматической сварки корпусов танков быстро внедрялась на заводах Урала, Сибири, Поволжья. Научные сотрудники Института электросварки из лаборатории перебрались в цеха, стали инструкторами-наставниками, мастерами, технологами. Конструкторская группа в кратчайшие сроки спроектировала специализированные установки для изготовления различных узлов боевых машин, в том числе для сварки кольцевых швов, которыми приваривались командирские башенки, для приварки отражательных подбашенных колец. Скоростная сварка заставила улучшить весь процесс изготовления корпусов. В цехе был изменен порядок рабочих мест, из вагонеток был сооружен конвейер для сборки и сварки танковых корпусов. Теперь уже заготовки в строгой последовательности поступали на сборочно-сварочные места, где из них формировались узлы и корпуса боевых машин.

Производительность нового способа сварки превзошла возможности сварки покрытыми электродами. Например, чтобы приварить днище подкрылка к борту старым способом сварки, высококвалифицированному сварщику нужно было затратить около 20 ч. Новичок после 5—10 дней обучения варил эти швы новым способом сварки за 2 ч. Ввод одной автоматической сварочной установки освобождал 7 сварочных трансформаторов и 8 дросселей-регуляторов, обеспечивал экономию 42% электроэнергии. Но главное — это высокое качество и необходимое количество танков.

О работе Е. О. Патона в то время была сложена легенда. Танкисты, ездившие на заводы получать танки, рассказывали своим товарищам, что ходит по цехам высокий седоусый профессор-академик, специально приехавший с Украины, выстукивает молоточком и выслушивает каждый танк. И если уж он

дает «добро», за машину можно не беспокоиться — снаряд не сможет пробить ее броню.

К лету 1942 г. Красная Армия имела 4065 новых танков, а во второй половине этого же года советская промышленность по производству танков уже обогнала промышленность фашистской Германии и поработанных ею стран. На танкостроительных заводах работало уже несколько десятков автосварочных установок. Советский Союз выиграл промышленную битву с германскими концернами. Летом 1943 г. Красная Армия одержала победу в беспрецедентном в истории войны танковом сражении под Прохоровкой, в районе Курска. Советские танкисты смело вступали в бой с фашистскими танками любых типов. За несколько дней были полностью разгромлены семь танковых дивизий нацистов.

А сварщики уже разрабатывали технологию соединения броневых плит толщиной 90 и 120 мм для тяжелых танков и самоходных установок серии «ИС».

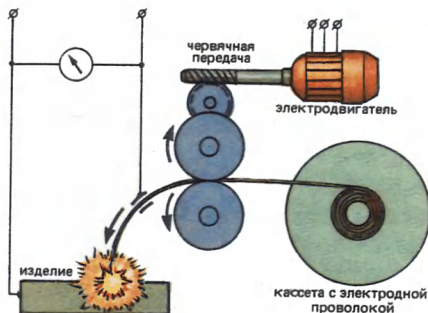
Но не только технология сварки была в центре внимания руководителя института. Во многом качество сварки зависело от аппаратуры.

Сварочная головка повышенной надежности.

Сконструированная в мирное время, рассчитанная на спокойную эксплуатацию, сварочная двухмоторная головка с обратной связью оказалась теперь недостаточно надежной. Моторы для подачи электродной проволоки в условиях военного времени работали плохо. Колебания напряжения в сети влияли на число оборотов двигателя постоянного тока, а следовательно, и на скорость подачи проволоки. Нарушение режима сварки неизбежно приводило к браку.

В настоящее время сварщики, используя достижения электроники, создали аппаратуру с надежными

Схема сварочной головки с постоянной скоростью подачи электродной проволоки.



стабилизирующими системами, с системами, регулирующими различные параметры дуги. При помощи этой аппаратуры можно управлять процессом сварки, программировать изменения параметров и т. д. В военное время даже стабилизация напряжения была почти неосуществимой технической проблемой.

Вторым недостатком довоенной головки была сложность ее механической части, основанной на использовании специального дифференциала. В мирное время на эту сложность никто и внимания не обращал, но в условиях военного времени, когда запасы комплектующих деталей кончились, выпуск сварочных головок оказался под угрозой срыва.

Е. О. Патон давно заметил недостатки двухмоторных головок и принимал все меры, чтобы упростить конструкцию, повысить надежность их работы. И все же наилучшим решением оказалась разработка принципиально нового аппарата. Новая головка была сконструирована с учетом свойства саморегулирования дуги, открытого в Институте электросварки в 1942 г.

Саморегулирование дуги проявляется при сварке плавящимся электродом при достаточно больших плотностях тока. При этом устойчивый режим свар-

ки характеризуется равенством скорости подачи электрода в зону дуги и скорости его плавления. Скорость подачи задают постоянной. В соответствии с ней устанавливается и скорость плавления, которая прямо пропорциональна коэффициенту плавления электрода и сварочному току. Чем больше скорость подачи, тем больше и сварочный ток, тем скорее плавится электрод.

Все это происходит при постоянной скорости подачи. Значит, в сварочных головках можно установить один двигатель, независимый от напряжения дуги!

На головки начали монтировать трехфазные асинхронные двигатели небольшой мощности (около 100 Вт) с постоянным числом оборотов.

Отпала необходимость в дефицитных купроксных выпрямителях, вместо дифференциала применили обычные шестерни. Упростилась электросхема. Для изменения скорости подачи ввели сменную пару шестерен. Простота в изготовлении и надежность работы новых сварочных головок были неоспоримы. И с декабря 1942 г. мастерские Института электро-сварки полностью перешли на их выпуск.

Флюс из доменного шлака. В разгар внедрения нового способа сварки в адрес Института электро-сварки начали поступать тревожные сообщения: «Кончаются запасы флюса!»

Стекольный завод, на котором перед войной был выплавлен флюс, остался на оккупированной территории. На Урале таких заводов не было. Необходимо было срочно ответить на вопросы: где получить флюс? Можно ли наладить его производство собственными силами?

Перед технологическими группами института, приступившими к поиску флюса-заменителя, возникла очень сложная задача — сделать флюс из мест-

ного сырья. Основываясь на опыте, накопленном при разработке сварки под флюсом, удалось рассчитать требующееся количество отдельных компонентов. Были найдены местные минералы, содержащие необходимые элементы.

Началась экспериментальная проверка. Различные минералы дробили, просеивали, тщательно взвешивали, перемешивали, засыпали в электропечь. После 2—3 ч варки при температуре около 1600°C расплав гранулировали (выливали) в воду, высушивали, размельчали, просеивали. Флюс испытывали сразу непосредственно на сварке. Требования были высокие.

При сварке дуга должна гореть устойчиво, с незначительными колебаниями тока и напряжения, пламя не должно прорываться через флюс, шов должен быть ровным, поверхность блестящая, с мелкими чешуйками, шлак должен свободно отделяться при легком ударе, никаких трещин и дефектов не допускается...

Одни составы были забракованы сразу, над другими продолжали работать, корректируя с точностью до 1—2% содержание компонентов. Последним критерием пригодности флюса были механические испытания сварных соединений и металла шва. Во время этих испытаний определяли сопротивление разрыву, предел текучести, относительное удлинение, ударную вязкость, относительное сужение, выносливость при повторных нагрузках.

Новый флюс назвали АН-2. Его удалось составить всего из четырех минералов: песка, известняка, марганцевой руды и небольшого количества плавикового шпата. При сплавлении их в стекловидную массу происходили некоторые химические превращения: флюс раскислялся, освобождаясь от закиси железа и высших окислов марганца (имевшихся в марганцевой руде, песке), дегазировался.



Е. О. Патон с моделью
танка Т-34.

Оставалось наладить его промышленный выпуск. Потребности промышленности во флюсе настолько возросли, что для его производства необходимо было построить завод наподобие стекольного. А чтобы снабжать его сырьем, необходимо было открыть новые карьеры. Нереальные в военные годы требования.

Е. О. Патон предложил использовать в качестве флюса доменный шлак, но он отличался повышенным содержанием серы, что для флюса не допускалось. Поэтому начали исследовать шлаки старых доменных печей, работавших на древесном угле, в котором не было серы. Шлак Ашинских домен вблизи Уфы оказался похожим на флюс АН-2. В нем недоставало только 10% окиси марганца.

Металлурги добавили марганцевую руду в доменную шихту, и к лету 1942 г. разработка «шлакового» флюса, получившего индекс АШ, была закончена. Новый флюс давал возможность сваривать

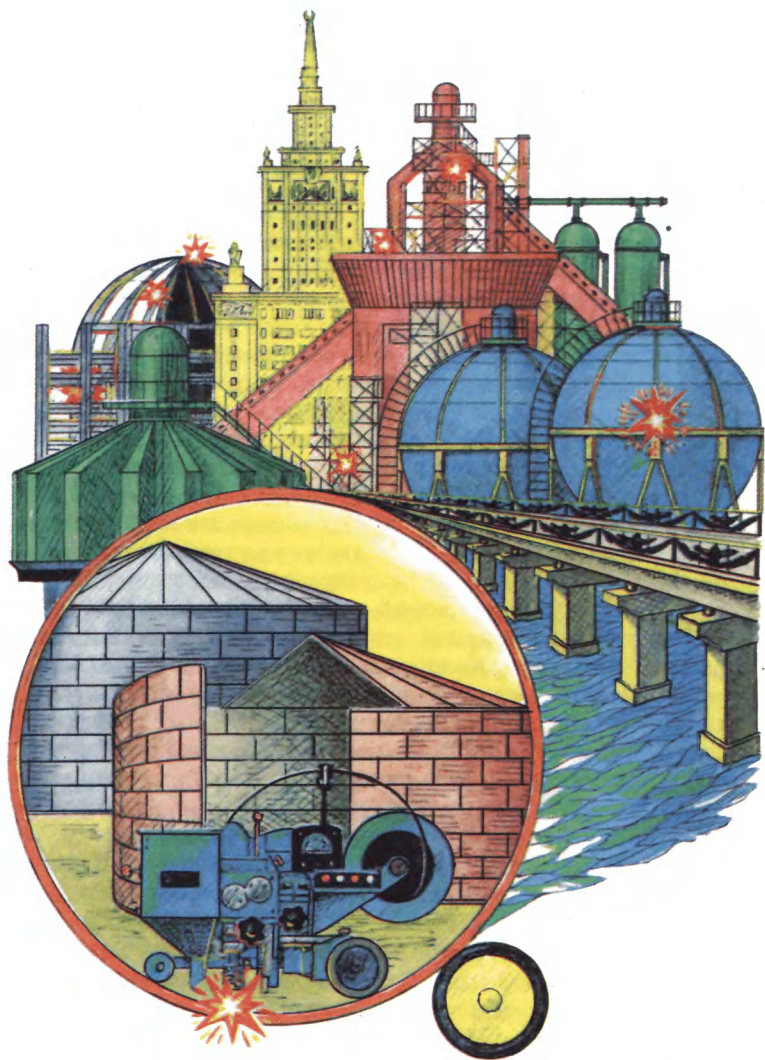
как броню, так и конструкционные стали. За выдающиеся заслуги в разработке скоростной сварки брони и ускорении выпуска боевой техники Е. О. Патон в марте 1943 г. был удостоен высокого звания Героя Социалистического Труда. В короткий срок, в сложных условиях военного времени коллектив Института электросварки разработал оборудование и технологию автоматической дуговой сварки бронекорпусов и других видов вооружения и боеприпасов. В США только в 1944 г. освоили сварку брони под флюсом, а в 1953 г. была выпущена первая сварочная головка с постоянной скоростью подачи электродной проволоки. В Германии до конца войны сваривали танки вручную.

Интенсивная практическая работа по созданию дуговой сварки под флюсом велась параллельно с научно-исследовательской работой. Особое развитие в этот период получили **металлургические основы сварки** и научные основы конструирования сварочной аппаратуры.

Сварка на стройках и в цехах

Новые условия — новые аппараты. Еще не окончилась Великая Отечественная война, а Институт электросварки им. Е. О. Патона вернулся в освобожденный Киев, где, не прекращая работы оборонного значения, занялся проблемами народного хозяйства. Тысячи разрушенных предприятий, домны, шахты, мосты ждали сварку.

Аппараты, технологию, флюсы, разработанные институтом для танков, теперь нужно было использовать для мирной продукции. Но массивные подвесные головки были рассчитаны для работы в стационарных условиях, в цехах, где они намертво крепились на стойках или перемещались по рель-



совым путям. Такие установки нельзя было применить на строительстве и монтажных работах для выполнения швов сложной конфигурации, таких, как набор и обшивка корпуса корабля или соединений в различных пространственных положениях, например для сварки стыков трубопроводов и многого другого.

Коллектив института начинает разработку переносных самоходных сварочных аппаратов — сварочных тракторов и полуавтоматов — портативных головок, перемещаемых вручную. И вскоре страна получила серию универсальных сварочных тракторов типа «ТС». Тракторы выполняют все основные функции сварочной установки и в то же время могут двигаться даже непосредственно по свариваемому изделию и выполнять прямолинейные и кольцевые швы стыковых, угловых и нахлесточных соединений.

Так была создана дуговая полуавтоматическая сварка под флюсом. При этом удалось сохранить все технологические преимущества, которыми обладал способ автоматической сварки. В полуавтоматах электродная проволока сматывается с катушки и заталкивается подающим механизмом в специальный шланг, а оттуда в горелку, укрепленную в держателе. Держатель находится в руке сварщика. Таким образом, механизированной осталась только подача проволоки, но зато рабочий получил возможность манипулировать дугой. Флюс в зону сварки попадает из небольшого бункера-воронки, прикрепленного к держателю. Полуавтоматы особенно широко стали применяться для сваривания коротких и прерывистых швов.

В начале 50-х гг. полуавтоматическая сварка значительно потеснила ручную там, где невозможно было внедрить автоматы, — при изготовлении сложных пространственных узлов и блоков кораб-

лей, вагонов, паровозов, тракторов, домен и каркасов зданий.

Принципы конструкции автоматов и полуавтоматов для сварки под флюсом позже послужили основой при создании аппаратов для дуговой сварки в защитных газах.

Сотни марок различных автоматов, полуавтоматов, приспособлений и вспомогательного оборудования спроектированы сварщиками-конструкторами Института электросварки им. Е. О. Патона, Всесоюзного научно-исследовательского института электросварочного оборудования в Ленинграде, конструкторами многих других научно-исследовательских институтов, кафедр высших учебных заведений, бюро промышленных предприятий нашей страны.

Мосты, уходящие в будущее. Особым этапом в развитии теории и техники электродуговой сварки стало строительство моста через реку Днепр в Киеве.

Мост — сложное инженерное сооружение — должен выдерживать большие статические и динамические нагрузки, поэтому к его прочности предъявляют особые требования.

В Институте электросварки разработали специальную малоуглеродистую сталь повышенного качества. Одновременно были разработаны соответствующие составы флюса и проволоки, методика проверки качества сварных соединений, режимы и приемы сварки металла большой толщины автоматами и полуавтоматами. Оставалось решить вопрос о конструкции будущих сварных мостов и о том, как организовать их изготовление. Ученые института предложили создать цельносварные мосты.

Однако оказалось, что многие ученые-мостостроители и сварщики считали цельносварные мосты делом будущего и настаивали на клепке монтажных

стыков. Рассудила спор практика. Через реку Снежень был построен цельносварной опытный мост пролетом 77 м, который выдержал опытные испытания.

Е. О. Патон — ученый-мостостроитель и ученый-сварщик — создал рациональную форму и оптимальную технологию изготовления сварных мостов. Он предложил отказаться от решетчатых ферм, которые невозможно сваривать автоматом, и заменить их крупными балками, сваренными из листовой стали. Такие балки решено было изготавливать на заводе с помощью автоматической сварки, а непосредственно на месте строительства выполнять только монтажные стыки между большими блоками. Фактически мосты стали строить на заводе.

Успешно освоил мостостроение Днепропетровский завод металлических конструкций. Этому заводу и доверили сварить 264 балки (каждая высотой 3,6 м, длиной 29 м и весом 28 т), из которых в Киеве был сооружен цельносварной мост длиной 1542 м. Весит он около 10 тыс. т. Почти все швы моста были сварены автоматами и полуавтоматами. Если бы конструкции клепали, то пришлось бы просверлить миллионы отверстий и на заклепки и накладки потратить дополнительно сотни тонн металла.

С тех пор прошло около трех десятилетий. Решения, найденные при строительстве моста им. Е. О. Патона, обогатили опытом отечественное и зарубежное мостостроение. Новые цельносварные мосты пересекали реки различных континентов.

Сварчиваемые нефтехранилища. Миллионы тонн нефти, добываемой ежегодно из недр земли, хранятся в нефтерезервуарах. Огромные стальные цилиндры диаметром в несколько десятков метров, высотой в два-три десятка метров вмещают в себя несколько тысяч тонн нефти каждый. Чтобы выдер-

жать напор жидкости, не прогнуться и не лопнуть, расчетная толщина днища и стенки среднего резервуара объемом 5000 м³ достигает 8 мм.

Еще до войны сварка уверенно закрепилась на строительстве резервуаров. Изготавливали их из отдельных листов шириной немногим более метра и длиной в пределах 10—20 м. Размеры эти ограничиваются возможностями прокатных станков и транспортных средств. Резервуары из таких «кусочков» строили, как кирпичный дом, — один лист прикладывали к другому, сваривали, потом следующий и еще следующий... пока не образовывалось днище. По краям днища устанавливали и приваривали листы стенки с необходимой кривизной. Собирали лист к листу до тех пор, пока пояс не замыкался. Затем на нижнем поясе собирали следующий и так далее, все выше и выше. Потом наступала очередь крыши, и опять собирали лист к листу, пояс за поясом.

Трудоемкой и сложной была такая работа. Большинство швов располагалось на вертикальной стенке. Выполнять их могли только сварщики высокой квалификации. Инженерно-технические и научные работники в разных странах мира настойчиво пытались усовершенствовать сложную технологию изготовления этой сравнительно простой сварной конструкции. Вопрос о строительстве нефтерезервуаров особенно остро встал в Советском Союзе, где на временно оккупированных фашистами территориях были уничтожены все нефтехранилища.

Как выполнить огромный объем сварочных работ по восстановлению нефтебаз? Где взять тысячи квалифицированных сварщиков?

Ученые Института электросварки им. Е. О. Патона предложили новый принцип сооружения резервуаров: почти всю сварку выполнять на заводе, в нижнем, удобном положении, высокопроизводительными автоматами, под слоем флюса.

Как можно сделать в цехе стальной цилиндр, высота которого в несколько раз превышает высоту помещения? И как такой цилиндр доставить на нефтебазы?

Ответы на эти вопросы были простыми, как и сама идея. Три основные листовые части резервуара — днище, стенку и крышу — изготавливать полностью в виде плоских полотнищ, соответствующих их развертке, а потом сворачивать в цилиндрические рулоны, удобные для транспортировки по железной дороге. А на месте, на нефтебазе, останется только сварка одного вертикального стыка стенок, шва конуса-крыши и двух швов, связывающих между собой днище, стенку и крышу, а также небольшой объем сварки по монтажу внутренней колонны, перекрытий и лестниц.

В начале 1948 г. впервые в мировой практике начали изготавливать резервуары по новой технологии. Цилиндрические рулоны, доставленные на монтажные площадки, легко разворачивались с помощью трактора, а швы при этом оставались невредимыми. За год на монтажных работах было сэкономлено до миллиона рублей, значительно улучшилось качество резервуаров.

Толстостенный котел из тонкого листа. Не раз сварка открывала возможности для создания нового оборудования, давала «добро» новым технологическим процессам, аппаратам, устройствам.

Трудно перечислить все сложные технологические, конструкторские и организационные задачи, которые пришлось и приходится решать сварщикам. Многие из решений коренным образом изменяли производство, удешевляя изготовление, упрощая конструкцию, улучшая эксплуатационные качества изделий.

Много технических проблем решено с помощью

сварки, и одна из недавних — проблема создания аппаратуры высокого давления. Повышение давления и температуры рабочей среды в энергетике, химической технологии дает заметный эффект. Но чем выше поднимались эти параметры, тем больше приходилось увеличивать толщину стенок сосудов и труб (20, 30, 40, 50 мм), тем труднее их было изготавливать: отливать, ковать, точить, сваривать.

И сварщики вводили «в бой» все более мощные средства: многослойную дуговую, электрошлаковую, электроннолучевую сварку. Технологические возможности сварки еще не были исчерпаны, когда вдруг оказалось, что повышать дальше толщину стенок не имеет смысла. Прочность металла толстых стенок уменьшалась по сравнению с прочностью такого же по химическому составу металла, но тонколистового.

Известно, что изделия из одной и той же стали, с одним и тем же составом элементов, но изготовленные разными методами обладают и различными механическими свойствами. Металл литого или даже кованого, но толстого бруска после прокатки в полосу небольшой толщины становится намного прочнее, потому что крупные кристаллы его дробятся, дефекты «выжимаются».

Но как воспользоваться этой давно известной истиной? Какую связь можно найти между тонким листом и толстостенными сосудами и трубами?

Новый принцип изготовления сосудов и труб обеспечил при любой толщине стенок прочность металла такую же, какую имеет и тонколистовой прокат. Заключается он в том, что сравнительно тонкие стальные листы накатывают на основной барабан в виде плотного рулона, образующего цилиндрическую обечайку сосуда или трубы. Концы ленты и торцы обечайки проваривают, поэтому слои не могут скользить друг по другу и многослойный сосуд не

разматывается. Длина обечайки равна ширине рулонной стали (1—2 м), и чтобы изготовить длинный сосуд, обечайки сваривают между собой кольцевыми прочноплотными швами. Многослойные сосуды высокого давления и трубы для магистральных газопроводов исключительно надежны. Создание этих конструкций явилось революцией в различных отраслях техники.

Сварные конструкции — в рамках науки. Много смелых, оригинальных идей, улучшивших технологию изготовления и изменивших облик машин, аппаратов, промышленных сооружений, предложили сварщики. И часто авторам новых проектов задают такие вопросы: «Как вы рискнули сворачивать, сплющивать, штамповать...? А если бы резервуар (труба, радиатор) лопнул при испытании?»

Тот, кто выдвигает и разрабатывает новые идеи, будь то научный работник или рабочий-новатор, всегда рискует столкнуться с непредвиденными, а может быть и неприятными, результатами. Уменьшить долю риска помогает знание. Для любого проекта и технологического процесса очень важно определение «обоснованный». Что касается сварных конструкций машин и различных сооружений, то в это определение в первую очередь входит расчет на прочность.

Сварщики уделяют большое внимание разработке более совершенных элементов и узлов сварных конструкций, расчету прочности сварных соединений, оптимальной технологии изготовления и изучению работы сварных соединений. Научные исследования в этом направлении ведутся в Институте сварки им. Е. О. Патона, в Московском высшем техническом училище им. Н. Э. Баумана под руководством Г. А. Николаева, в Ленинградском политехническом институте, в Научно-исследовательском институте

технологии судостроения и др. Для того чтобы машины или сооружение соответствовали своему назначению и могли нормально эксплуатироваться, их элементы (обшивка, перекрытия, ребра, каркасы и пр.) должны обладать таким запасом прочности, чтобы не разрушаться под действием рабочих нагрузок и собственного веса. Конечно, чем массивнее элементы конструкций, чем толще их сечение, тем большую величину внешних нагрузок они могут выдерживать.

Но это не единственный фактор, который нужно принимать во внимание при определении размеров конструкций и швов. Излишек металла увеличивает стоимость изготовления, а часто и эксплуатации, например в транспортных средствах. Увеличение размеров изделия приводит к возрастанию собственного веса.

Выход из создавшегося положения — рассчитать сечения элементов конструкций и сварных швов из условия, что напряжения, которые в них возникнут, будут на какую-либо определенную величину меньше напряжений, при которых разрушается материал, выбранный для изготовления нашей конструкции.

Физические возможности каждого конструкционного материала характеризуются **пределом прочности, пределом текучести**, ударной вязкостью, относительным сужением и другими показателями. Эти показатели определяют специальными методами. Например, чтобы определить предел прочности сварного соединения, вырезают полоску шириной от нескольких миллиметров до десятков миллиметров в зависимости от толщины металла. В середине такой полоски располагается шов. Образец укрепляют в испытательной машине и начинают растягивать, регистрируя прикладываемые усилия. Если усилие, при котором разорвался образец, разделить на пло-



Процесс контактной стыковой сварки оплавлением.

щадь его сечения (ширину умножить на толщину), то это и будет показатель предела прочности при растяжении.

Если элементы конструкции или швы работают не на растяжение, а на срез или сжатие, то во внимание принимается способность материала сопротивляться срезу или сжатию.

Сварные швы изгибаемых элементов конструкции подвержены в зависимости от их положения **растягивающим, сжимающим или срезающим** усилиям. Эти усилия рассчитываются по определенным формулам.

Те конструкции, на которые периодически действуют много раз повторяющиеся нагрузки, рассчитывают и на **выносливость**. При этом величину для допускаемых напряжений уменьшают, потому что прочность металлов при периодических нагружениях (определяется пределом выносливости или усталости) снижается и зависит от характера нагружения, от концентрации напряжений и других факторов.

Самый производительный способ сварки. Для соединения деталей контактной точечной сваркой достаточно десятых долей секунды. Причем одновременно на изделие можно ставить десятки электрозаклепок. Вот почему этот высокопроизводительный способ стараются применить при массовом производстве. Например, детали кузова автомобиля «Москвич-412» скрепляют пятью тысячами точек. Высокой производительностью и степенью автоматизации отличается и способ **контактной стыковой сварки**. Однако применяется этот способ для соединения деталей с малыми сечениями. Для сварки крупных изделий требовались огромные сварочные установки с мощными источниками электрического тока, способные развивать значительные усилия сжатия.

Ученые предложили выход из этого положения — более эффективный дополнительный нагрев. Так, при стыковой сварке оплавлением для подогрева торцов деталей удалось применить еще и другие явления преобразования электроэнергии в тепло. Разработанная в Институте электросварки им. Е. О. Патона технология сварки **методом непрерывного оплавления** изделий большого сечения позволила значительно снизить мощность сварочных машин и источников питания, увеличить производительность сварки при высоком качестве сварного соединения.

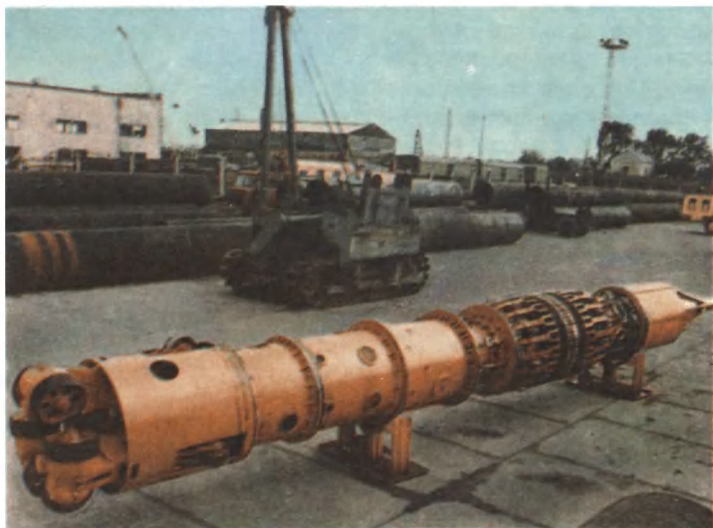
Особенно эффективным этот способ оказался при сварке рельсов, трубопроводов, картеров дизелей.

Мощность дизельных двигателей, которые выпускает Коломенский тепловозостроительный завод, составляет тысячи лошадиных сил. Картер — корпус, в котором располагаются цилиндры, клапаны и другие элементы — трудоемок в изготовлении. Эту объемную стальную конструкцию из множества пересекающихся между собой плоскостей сваривали вручную штучными электродами.

На изготовление одного картера уходило около

Для контактной сварки
кольцевых швов в
Институте электро-
сварки им. Е. О. Патона
создана специальная

установка (К-700),
самостоятельно переме-
щающаяся внутри тру-
бопровода.



месяца — сварщики с трудом манипулировали электродом в тесных ячейках. Многие ячейки располагались к тому же в вертикальной плоскости. Немного бы облегчился процесс, если бы даже создали специальный автомат для дуговой сварки: слишком много времени требовалось на предварительную подготовку и сборку деталей. Пришлось бы много раз переворачивать и наклонять тяжеловесную, многотонную конструкцию. Каждому автомату все равно был бы необходим сварщик.

Казалось, что сварка в данном случае исчерпала свои возможности и никакими средствами невозможно выполнить задачу, в которой основным условием

было записано: сократить время изготовления изделия, уменьшить число работающих и добиться стабильности качества шва независимо от квалификации сварщика.

Эту задачу решили сотрудники лаборатории контактно-стыковой сварки Института электросварки им. Е. О. Патона. Когда была пущена установка, ее возможности оказались поразительными: производительность труда, затрачиваемого на изготовление картера, возросла в 79 раз, его себестоимость снизилась в 18 раз. Вместо 300 человек (электросварщики, слесари-сборщики, контролеры) программу по изготовлению картера выполняет руководитель работ и два оператора.

Установкой заинтересовались многие зарубежные фирмы. Впрочем, работы советских сварщиков в области контактной сварки высоко ценились и раньше. Так, например, рельсосварочные машины, созданные Инститutom электросварки им. Е. О. Патона, работают в США, Японии, Франции, Италии, Бельгии, Польше, ГДР, ЧССР, Венгрии.

Покорение металлов и сплавов

Начиная с XVIII в. в результате бурного развития химии и металлургии, а затем и электротехники человечество получило много тысяч сплавов металлов с различными свойствами.

Интенсивно пополняется этот арсенал материалов и в настоящее время. Эти материалы способны «работать» в самых критических условиях, под действием сверхвысоких и сверхнизких давлений, способны сохранить прочность при таких температурах, когда обычные материалы плавятся, выдерживают действие агрессивных сред, обладают специальными электрическими, магнитными и другими свойствами.

Такие специальные материалы необходимы современной энергетике, радиоэлектронике, ракетостроению, авиации, химии и другим отраслям новой техники.

Нередко для соединения новых материалов существующие способы сварки оказываются неграждными. И тогда перед учеными-сварщиками возникает задача создать новый технологический процесс.

Для решения этой задачи необходимо: 1) выбрать способ подвода энергии к зоне сварки; 2) определить источник энергии и способ ее преобразования в вид, необходимые для сварки; 3) изыскать пути защиты зоны сварки, обеспечивающей высокое качество металла шва; 4) разработать основное и вспомогательное оборудование; 5) разработать сварочные материалы.

Прежде чем рассказать, как решены задачи сварки цветных металлов, рассмотрим, как совершенствуется сварка черного металла — стали. Ведь список новых материалов в основном пополняется за счет сплавов железа, основным из которых и является сталь.

Нелегкая работа создать защиту сварочной ванны. Многим отраслям промышленности и строительства потребовались материалы со специальными свойствами. Чтобы обеспечить требуемые теплостойкость и жаропрочность, магнитную проницаемость и вязкость, электросопротивление, металлурги вводили в сталь никель и хром, молибден и ванадий, вольфрам и титан, ниобий и цирконий и др. В 50-х гг. автоматическая и полуавтоматическая сварка сталей под флюсом по производительности труда и качеству сварного соединения опередила своих конкурентов — ручную дуговую сварку штучными электродами и газовую сварку.

В то же время флюсы и электродные покрытия,

разработанные для сварки одних сталей, не обеспечивали соответствующий состав и свойства металла шва при сварке других сталей.

Причиной этого были «незапланированные» химические реакции между элементами, входящими в состав флюса, металла кромок и электродного металла.

Правда, сварочная наука уже могла предсказать эти изменения. Раздел ее, получивший название **металлургии сварки**, изучал особенности металлургических процессов в зоне сварки. В малом объеме ванны при высоких и неравномерных температурах, быстром нагреве и охлаждении расплавленный флюс (шлак) и жидкий металл взаимодействуют всего несколько секунд. За это время одни элементы успевают перейти из шлака в металл, другие, наоборот, вытесняются из металла, количество третьих выравнивается или перераспределяется. Причем в зоне высоких температур средней части ванны реакции могут идти в одном направлении, а в хвостовой части — в противоположном.

Зная эти и многие другие особенности, можно было рассчитать составы флюсов для сварки каждого металла и после нескольких пробных сварок откорректировать состав так, чтобы все превращения в конце концов дали требуемый металл шва. Но состав флюса влияет не только на характер реакций. Каждый компонент по-своему изменяет и физические свойства флюса, от которых также зависит качество шва.

Например, если в момент кристаллизации ванны флюс окажется очень вязкий, то поверхность шва принимает форму затвердевшей шлаковой корки. При сварке кольцевых швов шлак не должен быть слишком жидким, потому что, стекая, он будет увлекать за собой металл ванны. И во всех случаях затвердевший шлак должен легко отделяться от шва.

При плавлении флюса должны выделяться газы, оттесняющие воздух от дуги, но они не должны быть вредными для здоровья.

Сварка под флюсом до сих пор не исчерпала своих возможностей, но проблемы научно-технической революции заставили ученых искать и другие пути соединения новых сплавов. И прежде чем в практику вошли новые источники энергии и такой прием улучшения качества металла, как вакуум, у сварочной ванны появилась новая защитная среда — газ.

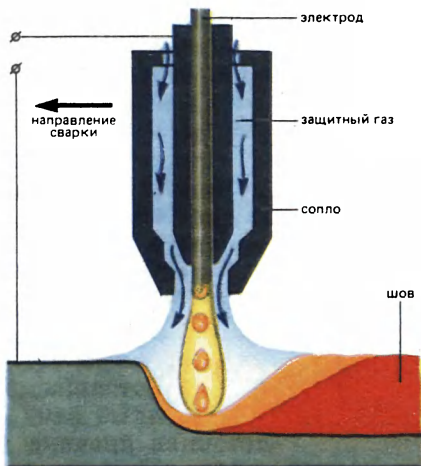
Газовый щит для самого прочного металла. Подавать газ в зону горения дуги предложил еще Н. Н. Бенардос. Примененный им горючий газ одновременно подогревал место сварки и оттеснял воздух от жидкого металла. Позже были предложены и некоторые другие газы и приемы их использования, однако заметного улучшения качества и повышения производительности достигнуть не удалось.

Процесс дуговой сварки в защитных газах протекал очень нестабильно (особенно с плавящимся электродом). Работать с такой дугой было трудно, а для улучшения ее технологических свойств необходимы были специальные источники питания, проволока специального состава, дешевые чистые газы и надежные механизмы для подачи проволоки.

К тому времени (в конце 40-х — начале 50-х гг.), когда ученые снова обратили внимание на сварку в защитных газах, некоторые вопросы в принципе были решены благодаря достижениям сварки под флюсом. Да и на вооружение электротехники поступили новые элементы, из которых можно было создать сварочные выпрямители с заданной или регулируемой характеристикой: стабилизаторы, обеспечивающие постоянство скорости подачи электрода, и т. д.

Основное внимание ученые, занявшиеся новыми

Сварка в защитных газах выполняется горелками, через которые в зону дуги и ванны подаются активные или инертные газы.



способами дуговой сварки, уделили исследованию характера плавления электродной проволоки. Советским сварщикам пришлось заниматься и металлургическими задачами. Они доказали, что в качестве защитной среды можно использовать дешевый углекислый газ. Правда, сам газ в условиях дуги диссоциируется, и избыток кислорода окисляет металл. Для того чтобы не выгорало железо и другие элементы, входящие в состав свариваемой стали, было предложено вводить **раскислители** — элементы, близкие по своим свойствам к кислороду. При сварке многих марок сталей окисляющее действие удалось компенсировать избыточным количеством обычных для сталей элементов — кремния и марганца. Для соединения изделий из высоколегированных сталей в сварочную проволоку дополнительно добавляют хром, титан, ниобий, алюминий.

Ученые США пошли по другому пути. Для защиты зоны сварки они применили инертные газы — аргон и гелий. Эти газы практически не вступают

в химические реакции с элементами свариваемых сплавов. Значит, рассчитывать состав электродной проволоки значительно легче — нужно только учесть, сколько каких элементов испарится, и соответственно увеличить их количество. Способы сварки в защитных газах были лишены недостатков способа сварки под флюсом, но имели существенные собственные недостатки, например разбрызгивание капель металла. Это вызвало необходимость проводить многочисленные научные исследования особенностей плавления электрода.

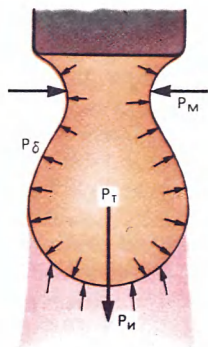
Отрыв и полет капли электродного металла. Исследования эти возглавили крупнейшие ученые-сварщики. Эксперименты проводились с помощью новейшей аппаратуры: скоростных и сверхскоростных кинокамер, шлейфных и катодных осциллографов, лазеров и рентгеновских аппаратов и др. Результаты экспериментов обрабатывались на ЭВМ. По результатам расчетов строились графики и таблицы.

Почему и зачем такое большое внимание вдруг уделили маленькой капле?

Потому, что маленькие капельки забрызгивали аппаратуру, и в первую очередь сопла горелок, увеличивали потери дорогой электродной проволоки. Потому, что капли, летящие хаотически, не всегда попадают в сварочную ванну.

Сила тяжести (P_T) при сварке в нижнем положении способствует отрыву капли, а в потолочном задерживает каплю на торце электрода. Электромагнитная сила сжатия (проводника с током) (P_M) стремится пережать перемычку, соединяющую жидкий металл с электродом, и тем способствует отрыву капли. Сила поверхностного натяжения (P_s) всегда притягивает каплю к электроду, но величина силы уменьшается по мере роста капли. Реактивная сила испарения ($P_{и}$) давит на каплю со стороны дуги.

Характер плавления электрода, размер и особенности перемещения капли зависят от действующих на нее сил.



Ученые не только разобрались в характере действия сил, но и нашли приемы, с помощью которых удалось усилить или уменьшить влияние отдельных сил и тем самым изменить характер переноса.

Один из самых эффективных приемов — воздействие на электродинамическую силу. Были сконструированы специальные источники питания, в которых на основной ток дуги накладываются электрические импульсы.

Параметры импульсов (ток, напряжение, мощность) изменяются по определенной программе, и еще до образования крупной капли пинч-эффект (магнитное поле) с большой силой «перезжимает» перемычку и отбрасывает каплю строго по оси электрода. 100 капель в секунду выстреливает такой электрод.

В настоящее время сварочная техника располагает большим набором разнообразных источников питания, которые облегчают сварку и помогают получить шов высокого качества. А работа над источниками питания продолжается. В будущем такие источники будут получать информацию о ходе процесса сварки и реагировать на все отклонения от заданных параметров режима. Еще лучшие результаты

будут получены, когда обратные связи станут учитывать качество сварных швов.

Для повышения качества сварки были разработаны и специальные электродные проволоки. В способе дуговой сварки порошковой проволокой сварщикам удалось совместить преимущества шлаковой и газовой защиты, обеспечить защиту зоны сварки от окружающего воздуха, легировать металл шва и стабилизировать дугу.

При этом сохранены варианты автоматической и полуавтоматической сварки.

Свариваемость металлов. Последние разработки ученых дали в руки сварщиков такие сварочные материалы, которые обеспечивают высокое качество соединения почти всех типов и классов сталей. Мы сказали «почти» потому, что возможности сварки не безграничны. Физические и химические свойства некоторых очень нужных для промышленности сплавов таковы, что любые способы сварки дают трещины, зоны высокой хрупкости, поры. Свойства сплавов зависят от количества легирующих элементов, но даже самые лучшие из них нельзя вводить неограниченно. Сварочная наука в настоящее время может предсказать, какие сплавы будут хорошо свариваться, а какие — плохо. Возьмем, к примеру, сталь.

Содержание углерода, марганца и еще ряда элементов в различной степени влияет на свариваемость сталей. Поэтому их воздействие сравнивают с влиянием углерода — приводят к эквиваленту углерода.

Ученые установили, что отрицательное воздействие хрома, молибдена приблизительно в 5 раз меньше, марганца — в 6 раз, кремния — в 24 раза, ванадия — в 14 раз меньше влияния углерода. Чтобы знать, сколько в низко- и среднелегиро-

ванную сталь можно ввести легирующих элементов, существует формула эквивалента углерода:

$$C_{\text{экв}} = C + \frac{\text{Mn}}{6} + \frac{\text{Si}}{24} + \frac{\text{Ni}}{10} + \frac{\text{Cr}}{5} + \frac{\text{Mo}}{4} + \frac{\text{V}}{14}$$

Вместо символов подставляется процентное содержание элементов и определяется $C_{\text{экв}}$. Надежное соединение толстолистовой стали без специальных приемов можно получить при условии, что эквивалент углерода в металле шва не будет превышать 0,47%. Если же расчетное эквивалентное содержание углерода будет выше, то для избежания трещин следует применить предварительный подогрев. Иногда в состав шва вводят элементы, снижающие склонность к трещинообразованию (например, титан).

Формула эквивалента углерода в сталях выведена опытным путем и не всегда отражает точную картину взаимодействия различных элементов в сварочной ванне и изменению структуры при охлаждении металла шва. Поэтому при определении свариваемости ученые сваривают образцы специальной формы, исследуют микроструктуру наплавленного металла и т. д. Правда, свариваемость многих сплавов давно известна. Хорошо свариваются малоуглеродистая сталь и технически чистый алюминий. Сниженной свариваемостью отличаются многие чугуны, большинство медно-цинковых сплавов.

Особую сложность представляет сварка **разнородных металлов**, отличающихся один от другого по свойствам. Большая разница температур плавления и кипения (железо — цинк, вольфрам — свинец), образование хрупких интерметаллических соединений (алюминий — медь, железо — титан) и другие причины вынуждают ученых разрабатывать специальные приемы сварки, особые сварочные материалы.

Да и сварка однородных, даже чистых металлов, обладающих хорошей свариваемостью (таких, как

алюминий, титан), имеет свои особенности, которые приходится учитывать ученым.

Тяжелая сварка легкого металла. Алюминий в природе встречается довольно часто и занимает третье место, после кислорода и кремния, и первое место среди металлов. Этим он обязан своим ценным свойствам, особенно малой плотности, высокой теплопроводности и электрической проводимости, высокой пластичности и хорошей коррозионной стойкости.

Алюминий широко применяется во многих областях техники, кое-где вытеснил сталь, чугун, медь. Но получить качественное сварное соединение из алюминия очень сложно из-за особенностей его физических и химических свойств. Несмотря на сравнительно низкую температуру плавления алюминия (660°C), из-за высокой теплопроводности и теплоемкости и большой скрытой теплоты плавления для создания сварочной ванны требуется значительное количество тепла.

На поверхности алюминия при контакте с воздухом (или другой кислородсодержащей средой) мгновенно образуется прочная окисная пленка, которая хорошо защищает металл от коррозии. Чтобы расплавить эту пленку, необходима очень высокая температура. Расплавить ее так же трудно, как железный чайник, в котором кипит вода (разность температур плавления этих пар веществ приблизительно одинаковая).

В принципе для сварщиков не представляет особой трудности расплавить железо раньше, чем успеет закипеть вода. Но, как вы уже знаете, задача у сварщиков посложнее — получить качественное соединение. Окисная пленка алюминия, толщина которой резко возрастает с повышением температуры, препятствует сплавлению кромок. Ее обломки за-

стревают в металле ванны, ухудшают прочность и герметичность соединения.

Наиболее эффективными средствами для удаления окисной пленки оказались действие электрического тока и химическое взаимодействие с элементами из группы галогенов. В природе известно много соединений, содержащих галогены,— хлор и фтор, однако для сварочного флюса выбор ограничивался особыми требованиями, в том числе и невысокой температурой плавления ($600—700^{\circ}\text{C}$). Этим требованиям удовлетворяют галогенные соли щелочных и щелочноземельных металлов (NaF ; Li ; NaCl ; KCl ; Na_3AlF_6), которые и послужили основой для флюсов и электродных покрытий.

Когда были определены составы и изготовлены флюсы, оказалось, что дуга под ними не горит. Правда, дуга возбуждалась вполне нормально, но, как только образовывалась ванна с расплавленным над ней флюсом, дуга начинала гореть очень неустойчиво, режим сварки нарушался. Причину этого явления нашли быстро: флюсы в расплавленном состоянии обладают высокой электропроводностью и шунтируют дугу. Ток от электрода идет в основном не через дуговой плазменный промежуток, а через окружающий жидкий флюс.

Как заставить ток идти через дугу, не изменяя состава флюса?

Ученые уменьшили высоту слоя флюса настолько, чтобы она стала меньше длины дугового промежутка. Теперь часть дуги горела снаружи, и способ уже нельзя было называть «сварка под флюсом».

Способ сварки по флюсу обладает многими положительными качествами и нашел широкое применение в промышленности. Однако его недостатки: невозможность применения при сварке в различных пространственных положениях и снижение коррозионной стойкости из-за остатков флюсов металла шва

Алюминиевые балки каркаса и листы обшивки вагона скоростного электропоезда сое-

динены сваркой в конструкцию, способную выдерживать большую динамическую нагрузку.



на поверхности шва — вынуждали продолжать исследования и разрабатывать способы сварки в инертных газах плавящимся и неплавящимся электродами. При этом изделие подключают под отрицательный потенциал источника питания или питают дугу переменным током. Окисная пленка в зоне сварки подвергается катодному распылению.

В борьбе за повышение скорости движения. Поисковая научно-исследовательская работа сварщиков не заканчивается созданием способа сварки и аппаратуры. Очень часто применение нового способа сварки для того или иного изделия, разработка конкретной технологии выливаются в сложный научный поиск, в котором участвуют не только ученые, но и заводские рабочие, техники, инженеры. Без вдумчивого, творческого отношения к труду всех, кто на

производстве участвует в освоении новой технологии и аппаратуры, невозможно было бы достичь успехов.

Примером такого содружества науки и производства может служить совместная работа сотрудников научно-исследовательских институтов с работниками Калининского и Рижского вагоностроительных заводов над созданием пассажирских вагонов из алюминиевых сплавов.

Чтобы повысить скорость движения, необходимо уменьшить вес вагонов. Поэтому решено было разработать конструкцию и технологию изготовления пассажирского электропоезда из алюминиевых сплавов. 200 км/ч — такая скорость была записана в техническом задании на проектирование «Русской тройки». Это требование можно было выполнить только при минимальном весе и максимальной прочности вагонов.

В традиционных стальных вагонах основную нагрузку несла на себе мощная хребтовая балка, на которую и опирался весь кузов. В новом, алюминиевом вагоне от такого тяжеловесного «хребта» отказались. Его обязанность решили возложить на боковые стенки, воспринимающие нагрузку от остальных узлов.

Тщательные исследования позволили отобрать четыре способа сварки, оптимальные только для определенной группы соединений. В Институте электро-сварки им. Е. О. Патона была рассчитана последовательность сборки и сварки элементов и узлов с минимальными деформациями и напряжениями. В результате вес цельносварного вагона Калининского завода при замене стали алюминием уменьшился с 51 до 26 т.

Металл, поглощающий воздух. Редко кто, кроме сварщиков, имеет право называть так титан — серебристо-белый металл, обладающий, по крайней ме-

ре, двумя непревзойденными свойствами: высокой удельной прочностью (прочность, отнесенную к плотности) даже при температуре 500°C и отличной коррозионной стойкостью во многих агрессивных средах. «Вечный» металл уже стал незаменимым в химическом машиностроении, авиапромышленности, радиоэлектронике, судостроении, пищевой промышленности. Из титана уже воздвигают и монументальные сооружения. Одним из первых был открытый в 1964 г. в Москве обелиск в честь запуска в СССР первого искусственного спутника Земли.

Сварить титан нелегко. Трудность вызвана большой химической активностью при высоких температурах. Металл, нагретый чуть выше 400°C , начинает буквально поглощать кислород, азот, водород и портиться на глазах: изменяется цвет, снижается пластичность и вязкость, в сварных швах появляются холодные трещины. И что самое опасное — треснуть соединение может спустя несколько месяцев.

Но сваривать титановые изделия необходимо. Прочность титановых сплавов находится в пределах 100 кгс/мм^2 и почти достигает показателей прочности легированных сталей, а плотность ($4,5 \text{ г/см}^3$) чуть ли не вдвое меньше стали. Металл как будто специально был создан для самых различных космических конструкций.

Спускаемый аппарат лунного корабля «Аполлон» инженеры США сваривали в камере, заполненной абсолютно чистым аргоном. Специальные газоанализаторы следили за чистотой аргона и мгновенно автоматически выключали сварочную аппаратуру, как только в камере появлялись вредные газы.

Но ведь из титана хорошо бы сделать и огромные химические реакторы, и заводские трубы высотой в сотни метров. Стоимость камер для таких изделий да труд сварщиков в скафандрах не окупится всеми эксплуатационными преимуществами титана. По-

этому легче и дешевле сваривать титан в обычных атмосферных условиях.

Для защиты участка, примыкающего к шву и нагреваемого свыше 400°C , разработаны специальные приспособления: удлиненные насадки и защитные козырьки, прикрепляемые к горелкам, через которые подают аргон. Дуговую сварку титана и его сплавов можно выполнять как неплавящимся электродом в аргоне, так и плавящимся в аргоне и под флюсом. Однако наиболее качественный металл шва получается при использовании специальных флюсов — паст. Этот способ совмещает в себе преимущества способа сварки титана под флюсом и сварки неплавящимся электродом в аргоне. Флюсы и флюсы-пасты имеют одну особенность — в их состав не должны входить вещества, содержащие кислород, поэтому основой их являются фториды и хлориды щелочных и щелочноземельных металлов. Стыки большой толщины соединяют электрошлаковым способом. А при сварке титана над поверхностью шлаковой ванны специально пропускают аргон.

Под дугой один из старейших металлов. Медь — металл, известный с древних времен, в период научно-технической революции играет большую роль в тех отраслях промышленности, где требуется ее исключительная электропроводность и теплопроводность. Кроме того, медь достаточно хорошо сопротивляется коррозии, легко обрабатывается, устойчива против перехода в хрупкое состояние даже при температурах глубокого холода. Медь нашла широкое применение в электротехнике, в холодильных установках; из нее делают многие детали сварочных установок, работающие в сложных температурных условиях, — сопла горелок, водоохлаждаемые кристаллизаторы, ползуны, ограничивающие шлаковую ванну.

Конечно, сварщики не остались в долгу перед таким важным для них металлом. В принципе медь обладает хорошей свариваемостью, если не считать таких свойств, как 1) легкая окисляемость в расплавленном состоянии и образование закиси меди (эта закись концентрируется по границам кристаллов — и в результате трещины); 2) пониженная стойкость против пор из-за выделения водяного пара при кристаллизации; 3) высокая теплопроводность; 4) высокая жидкотекучесть и т. д. В настоящее время для изготовления медных изделий применяются как старые способы дуговой сварки (угольным электродом, вручную покрытыми электродами), так и новые (под флюсами, в защитных газах, плазменный). В качестве защитных газов для меди кроме инертных применяются азот и даже водород. Металл толщиной более 4 мм обычно сваривают с подогревом.

Труднее сваривать сплав меди — латунь. Для того чтобы предотвратить испарение легкоплавких составляющих, особенно цинка, разработаны специальные технологические приемы.

В лабораториях сварщиков — новые металлы.

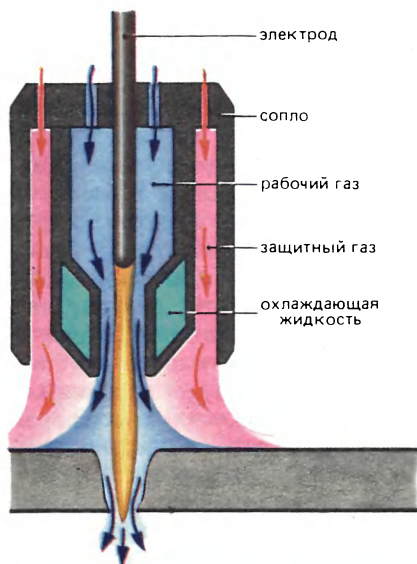
С развитием новых отраслей техники расширяется применение металлов, обладающих различными, чаще всего уникальными, свойствами. Однако особенности каждого металла очень часто вынуждают разрабатывать специальные приемы сварки.

Рассмотрим некоторые из таких сплавов. Никель обладает очень высокой стойкостью против коррозии, жаропрочностью, большим омическим сопротивлением. При изготовлении аппаратов для химической промышленности, для электрохимии наибольшее применение находит аргонно-дуговая сварка вольфрамовым электродом, вытеснившая остальные виды дуговой сварки. Технология сварки никеля имеет большое сходство с технологией сварки ле-

гированных сталей, однако никель намного чувствительнее к образованию пор. Поэтому в зоне сварки недопустимо присутствие азота и кислорода.

Наибольшую сложность для сварщиков представляют тугоплавкие металлы (и сплавы на их основе): цирконий, ниобий, вольфрам, ванадий, молибден и др. Применяются тугоплавкие металлы в ответственных конструкциях (в том числе и в атомных реакторах, ракетно-космических системах), и требования к сварным соединениям предъявляются самые жесткие. В комплексе с замечательными эксплуатационными свойствами этих металлов находятся и отрицательные технологические: склонность к образованию трещин, высокая температура плавления, стремление вступить в реакцию с газами атмосферы при повышенной температуре, хрупкость при насыщении газами.

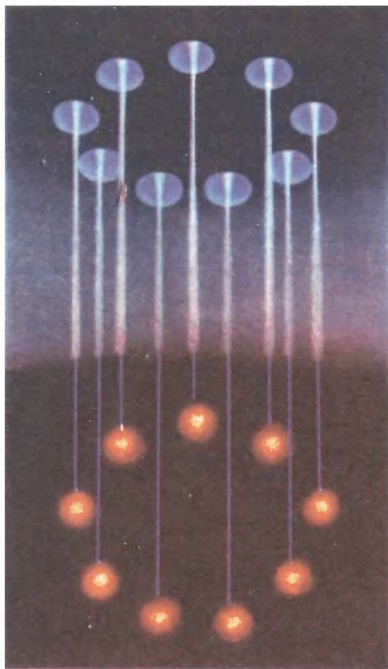
Наибольшими возможностями при решении проблем соединения новых металлов обладают способы сварки с высокой концентрацией энергии. Сварщики изыскивают всевозможные приемы сжатия дугового разряда — самого распространенного и универсального источника. Если бы дуга вела себя, как обычный металлический проводник, то повысить плотность тока в столбе и в активных пятнах можно было бы простым увеличением силы тока в сварочной цепи. Но процессы, о которых мы рассказали, приводят к тому, что одновременно с увеличением тока увеличивается и диаметр столба. Количество выделяемого в дуге тепла возрастает, но концентрация его и температура почти не увеличиваются. Только благодаря сжатию дуги в специальных **горелках-плазмотронах** удастся повысить концентрацию энергии и среднемассовую температуру, что дает ощутимый технологический эффект. В последнее время были созданы плазмотроны, в которых вместо аргона в качестве плазмообразующего применяется деше-



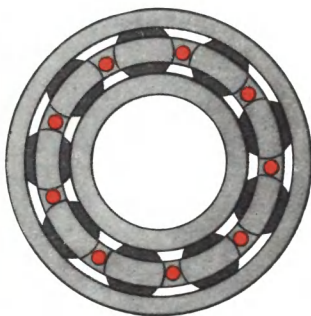
Плазменно-дуговая сварка. В современных сварочных плазмотронах температура дуги превышает $30\,000^{\circ}\text{C}$ при плотности теплового потока 300 кВт/см^2 .



Микроплазменная сварка быстро завоевала огромную популярность в приборостроении, ювелирном деле, электротехнике и других отраслях промышленности, имеющих дело с тончайшими изделиями.



Покорив электронный луч, сварщики получили возможность выполнять швы сложной конструкции. Рассеянным электронным лучом можно одновременно соединить детали в нескольких точках.



вый углекислый газ. Открылась дорога к плазменной сварке обычных сталей, появилась возможность увеличить скорость сварки металлов средней толщины до нескольких сотен метров в час.

Конечно, сварщики не могли выпустить из поля зрения и лучевые источники тепла. Ученые разных стран, занимающиеся сварочными проблемами, внимательно следили за успехами физиков в области оптики, лазерной техники. И не только следили, но и интенсивно проводили собственные исследования, необходимые для практического применения в сварке.

Уже первые исследования показали — световой

луч обладает некоторыми уникальными свойствами. Он не требует вакуума, так как может проходить через значительный слой воздуха, не ослабевая. Более того, тепло можно передать и через стеклянную оболочку, прикрывающую изделие. Очень важным свойством следует считать то, что в зону нагрева лучи не вносят примесей других веществ.

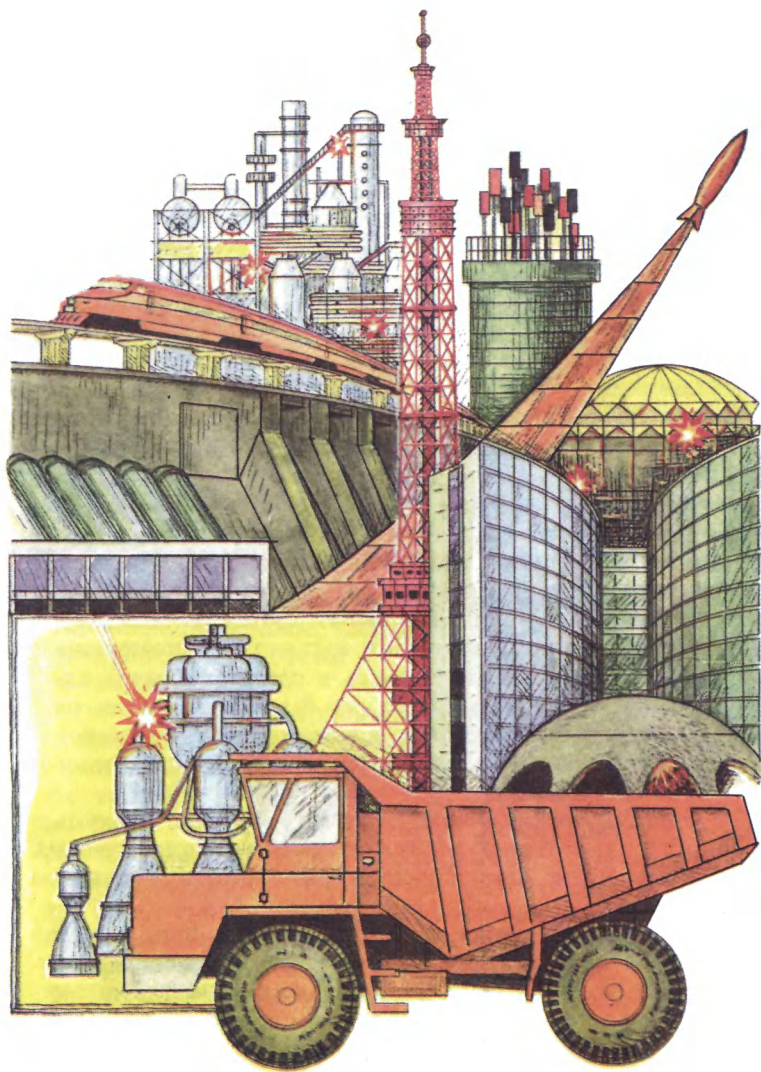
Исследователи не сомневаются в отдельных преимуществах **фотонной сварки** (от искусственного источника света) и **гелиосварки** (от Солнца), и не исключено, что через небольшой отрезок времени очередные проблемы научно-технического развития будут решены с помощью новых способов сварки.

В авангарде научно-технической революции

Комплексная механизация и автоматизация. Во время проектирования мостов, вагонов, машин, резервуаров или других конструкций специалисты стараются учитывать требования сварочной науки. Конструкторы и технологи расчленяют свои конструкции на такие узлы, чтобы их удобно было собрать и сварить. Но в некоторых случаях бывает так, что собирать и сваривать изделие все равно неудобно и непроизводительно. Тогда сварщики сами основательно переделывают конструкцию под сварку.

Выполнить такую работу непросто. Сварщику необходимы при этом глубокие знания в своей отрасли, а также в той отрасли, к которой принадлежит сварная конструкция. К тому же необходима смелость и инженерная смекалка, умение критически мыслить.

Чтобы преобразовать производство, сварщик должен узнать и понять всю проблему в целом, должен уметь мысленно отказаться от того, что считается самым совершенным, и найти новое, более совершен-



ное решение. Конечно, не во всех случаях требуется такой подход к делу. Для развития техники нужны и отдельные, на первый взгляд незначительные усовершенствования. Но иногда без основательной, революционной ломки не обойтись. И тогда приходится решать очень интересные инженерные задачи. Такие, например, как задача о бытовом отопительном приборе, о всем известном и привычном чугунном радиаторе-батарее.

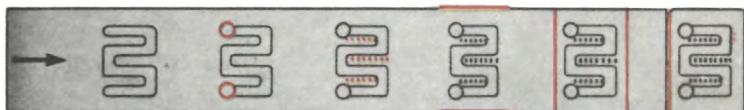
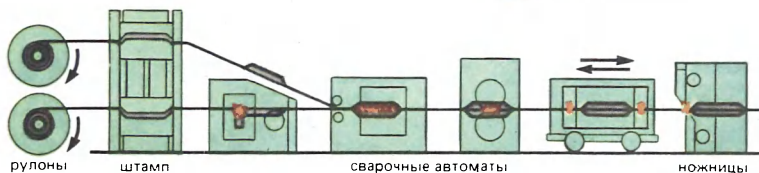
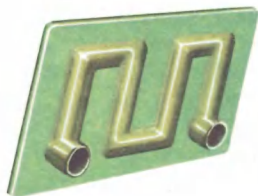
Радиаторы на сварочном стане, или «задача о домашней батарее». Чугунная батарея еще совсем недавно была в квартирах и производственных помещениях самым совершенным отопительным прибором. Объем строительства в СССР растет с каждым днем. Соответственно все больше и больше требуется отопительных радиаторов. А на изготовление массивных чугунных батарей уходит много металла — расход его к концу 60-х гг. дошел до миллиона тонн в год. Кроме того, мешает монтажу большой вес, сложная и трудоемкая сборка из отдельных секций, потребность в специальных нипелях-чайках. Да и уже смонтированные, они выглядят в помещении громоздкими, собирают пыль в своих лабиринтах.

Таким образом, необходимо было уменьшить расход металла, улучшить внешний вид радиатора, упростить сборку, автоматизировать процесс массового изготовления.

Решить поставленные задачи удалось с помощью сварки, изменившей не только весь технологический процесс, но и конструкцию самого отопительного прибора.

Радиаторы нового типа изготавливаются из **тонколистовой стали**. Свариваются две плоские заготовки, в которых выштампованы каналы для циркуляции воды. Производство начинается с размотки двух рулонов стали. Стальная полоса шириной, рав-

Две стальные ленты, пройдя через поточную линию изготовления радиаторов, превращаются в готовое изделие.



ной высоте будущих радиаторов, проходит между парными роликами, на одном из которых имеются выступы, а на другом — углубления. Это **пуансон** и **матрица** — рабочие элементы штампов, только вместо обычной периодической штамповки каждой отдельной заготовки ролики непрерывно формируют на ленте одну заготовку за другой. Причем заготовки тянутся в виде ленты со скоростью несколько метров в минуту. То же самое происходит и со второй лентой, только к ней еще автомат успевает приварить патрубки. Обе полосы сближаются и на ходу соединяются сперва точечной сваркой, а затем продольными и поперечными швами — **контактной сваркой**. Чтобы не останавливать полосу даже при сварке поперечного шва, сварочная машина движется вместе с заготовками, а затем возвращается в исходное положение на повышенной скорости. Эту ма-

шину метко назвали летучей. Остается отрезать готовый радиатор от движущейся ленты.

Новые радиаторы не загромождают квартиры, они гигиеничны, у них более высокие теплотехнические характеристики по сравнению с чугунными. Почти 500 тыс. т. металла, около 80 млн. рублей в год — такой экономический эффект простого решения «задачи о радиаторах» с помощью сварки.

Еще одна задача — «о трубе». Оригинальные смелые технические решения заложены в поточные линии по изготовлению труб на трубопрокатных заводах при помощи сварки.

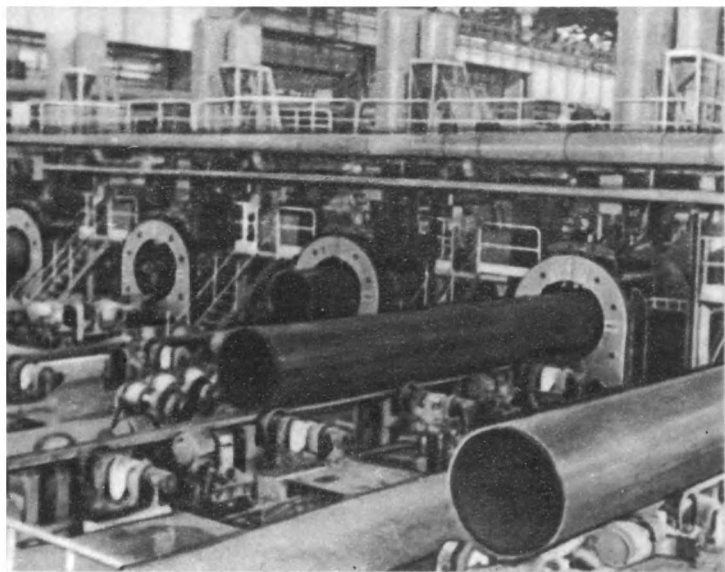
Трубы известны людям несколько тысячелетий. Сначала шли в употребление естественные, почти полностью приготовленные природой, бамбуковые трубы, потом керамические и, наконец, металлические, имеющие в современной экономике большое значение. Изготавливали их прокаткой, литьем, сваркой, волочением и другими способами. У каждого из способов были свои преимущества и недостатки. Так было до тех недавних пор, пока человечеству не потребовались в огромном количестве нефть и газ. И так уж случилось, что основные потребители топлива и сырья для химической промышленности расположены далеко от природных месторождений. Тысячи километров труб нужны для магистралей.

А диаметр таких труб — от 1 до 2 м, толщина стенки — 10 мм и более. Каким способом переделать миллионы тонн стальных заготовок в прочные герметические трубы?

Кроме сварки, никакие известные технологические процессы не смогли справиться с такой проблемой. Несколько принципов производства труб большого диаметра разработали и внедрили сварщики.

Один из принципов — **косое свертывание** (под углом) рулонной ленты в цилиндрическую трубную за-

В этом цехе сваривают
трубы.



готовку. Так как кромки ленты стыкуются по спира-
ли, то такие трубы называли спирально-шовными, а
линии по производству спиральношовных труб —
сварочным станом. Первая операция на стане — раз-
вертывание рулона полосной стали.

Полосу пропускают через правильные вальцы и
обрезают кромки. Стальная полоса подается в фор-
мирующее устройство. Здесь она сворачивается в
трубу и сваривается. Когда один рулон кончается,
то его конец догоняет начало другого рулона, они
состыковываются, в работу вступает специальная
сварочная головка, и шов прочно соединяет обе
полосы.



Такие станы полностью механизированы. Человеку остается только управлять работой машин. Дело это не простое. С огромной скоростью проносятся кромки стыков под сварочными головками, мощные, тысячеамперные дуги, невидимые под слоем флюса, плавят сталь, и только серебряная ниточка блестящего шва появляется на выходе из стана. Четко, уверенно должен действовать сварщик-оператор, мгновенно реагировать на нарушения процесса. Минута промедления — и десятки метров трубы могут уйти в брак.

Поэтому и держат в поле зрения в Институте электросварки им. Е. О. Патона среди многих других проблем эту проблему, разрабатывают новые технологические процессы для сверхскоростной свар-

ки на станах. В скором времени кромки будут нагревать токи высокой (радиотехнической) частоты, исчезнет со станов флюс с неизбежной пылью, не нужно будет следить за положением сварочной головки и подачей электродной проволоки. Управление режимом сварки будет полностью автоматизировано. Первые такие станы уже успешно работают.

Робот-сварщик первого поколения. В настоящее время массовое производство автомобилей и комбайнов, вагонов и велосипедов и многого другого немыслимо без конвейеров. Сварка на конвейерах полностью механизирована и выполняется автоматами. Сварщику при этом остается только запуск аппаратов и контроль за ходом сварки. Но скорость производственных процессов настолько возросла, что человек не успевает отреагировать на случайные отклонения режима. Нужно было создать робот — устройство, способное само управлять и выполнять программу сварки при больших скоростях.

На промышленных предприятиях уже применяются вместо человека роботы, которые выполняют тяжелые физические работы. Эти роботы первого поколения работают по жесткой программе. Они пока не способны сами реагировать на отклонение от нормального хода процесса. Но они отличаются от автоматов и прочих машин тем, что «применяют» приемы, которые человек выполняет руками. Робот обладает свойством, которого нет у автоматов, — самоуправляемостью. Промышленные роботы не похожи на человека внешне. Робот — это машина, которая внешне напоминает ящик с исполнительным механизмом — штангой, или, как ее еще называют, рукой робота. Штанга, подобно руке человека, перемещает детали или инструмент в некоторую точку пространства и ориентирует его определенным образом.

Рука робота приводится в движение различными приводами — электрическими, гидравлическими или пневматическими, которые передают движение на соответствующие механизмы. Движение строго определено командным сигналом, который поступает от устройства управления. Устройство управления (электронное устройство) не только управляет автоматическими действиями робота, но и обеспечивает связь с обслуживаемыми установками и осуществляет программирование при обучении. На основе подобных роботов в Институте электросварки им. Е. О. Патона создали промышленного робота — сварщика. Искусство квалифицированного сварщика было заменено запрограммированными элементарными операциями, которые запоминаются электронным устройством. Благодаря электронному запоминающему устройству робот может обучаться, способен быстро перестраиваться на другие движения и может работать совместно с другими роботами. Сварщик-оператор предварительно обучает робота. Он сам, вручную ведет инструмент, укрепленный в кисти робота. Траектория перемещения инструмента запоминается электронным устройством. Система обучения робота должна быть простой. После обучения он выполняет сварку самостоятельно.

Первые сварочные роботы были сконструированы для контактной точечной сварки. Поставить сварную точку сварщик успевает за доли секунды. Но быстро переносить клещи от точки к точке (на расстояние, скажем, 100 мм), останавливать их в определенном месте, ориентировать электроды в течение рабочего дня нелегко. Человек устает, сбивается с ритма, пропускает точки. А изделие-то находится на конвейере: каждые несколько десятков секунд — и готовый автомобиль или комбайн, опоздал — заготовка уехала, пропустил точку — уменьшилась прочность. Робот же не устает. Вот почему успешно на

Горьковском автозаводе прошли испытания первых сварочных роботов ИЭС-690, «обученных» контактной сварке. Затем сотрудники Института электро-сварки им. Е. О. Патона совместно с работниками Тульского комбайнового завода создали робот для дуговой точечной сварки. В настоящее время робот-сварщик, вооруженный горелкой, «учится» варить короткие и протяженные швы во всех пространственных положениях.

Ученые, инженеры и рабочие продолжают творческий поиск. На очереди не только работы по совершенствованию роботов первого поколения, но и создание роботов второго поколения, оснащенных органами для ощущения условий сварки.

Многообразие проблем. Все больше сварочных работ удастся поручить машинам. Развитие сварочной техники подчиняется всеобщему закону технического прогресса, про который В. И. Ленин сказал: «В замене ручного труда машинным... и состоит вся прогрессивная работа человеческой техники. Чем выше развивается техника, тем более вытесняется ручной труд человека, заменяясь рядом все более и более сложных машин...»

За последние полвека сварка из вспомогательной и ремонтной операции превратилась в ведущий технологический процесс современной промышленности.

Сварочная наука поднялась на большую высоту и в состоянии справиться с разнообразными задачами. На помощь ученым, конструкторам и технологам пришли электронно-вычислительные машины. Мощная научно-исследовательская база создана в СССР — десятки специализированных и отраслевых институтов, десятки кафедр в вузах занимаются проблемами сварочной науки и техники. Институту электросварки им. Е. О. Патона — головной научно-

исследовательской организации поручено координировать исследования по сварке в нашей стране.

Достижения советской сварочной науки признаны во всем мире, разработки используются даже непосредственно в физике и других областях науки. Во время уникального советско-французского эксперимента в околоземном космическом пространстве французская ракета «Эридан» подняла специальную электронную пушку, созданную в Институте электросварки им. Е. О. Патона. Покоренные сварщиками электроны «работали» хорошо и вызвали в магнитосфере искусственное полярное сияние.

Успешно развивается международное сотрудничество сварщиков. Больших успехов достигли ученые-сварщики Болгарии, Венгрии, Польши, Румынии и других стран. Теперь совместными усилиями сварщиков стран СЭВ могут быть решены самые сложные проблемы. Примером этому служит унифицированный полуавтомат для дуговой сварки и наплавки «Интермигмаг», разработанный учеными и конструкторами НРБ, ГДР, СССР и ЧССР; установка для электроннолучевой сварки деталей автомобилей «ИЭС-ЦИС 700», созданная сварщиками СССР и ГДР.

Сварщики 43 стран мира систематически обмениваются важной информацией о своих достижениях на ежегодных конференциях Международного института сварки. На базе Института электросварки им. Е. О. Патона работает семинар по повышению квалификации инженеров-специалистов Советского Союза и семинар ООН для специалистов из развивающихся стран Азии и Африки.

В комплекс задач сварочной науки входит не только соединение металлов и неметаллов, но **напыление и наплавка** — важные технологические процессы, применяемые для восстановления изделий или получения деталей с особыми свойствами. Свар-

щики занимаются и изысканием методов контроля качества сварных соединений, не нарушая их целостности. Сварочная наука уже дала производству такие методы контроля, как гаммаграфирование, капиллярная дефектоскопия, ультразвуковая дефектоскопия, вакуумирование, масспектрометрические течеискатели и др.

Сварщики занимаются и проблемами **термической резки и строгания металлов и неметаллов**, применяя для этих целей газовое пламя, плазму, энергию взрыва и др.

На базе достижений сварочной науки и практики создана самостоятельная наука и отрасль производства — **специальная электрометаллургия**. Способами электрометаллургии: электрошлаковым, электронно-лучевым, плазменно-дуговым — удалось получить особо чистые и специальные стали и цветные металлы, крайне необходимые для современной техники.

Большое внимание уделяют ученые при создании новых методов сварки вопросам **охраны труда и защиты окружающей среды** от загрязнения отходами производства. В Институте электросварки им. Е. О. Патона есть отдел гигиены труда, сотрудники которого проводят медицинские исследования различных способов сварки. Например, для старейшего способа ручной дуговой сварки покрытыми электродами заново разработаны составы электродных покрытий, которые не дают во время сварки токсических летучих соединений. Ученым удалось также улучшить сварочные свойства электродов.

Расширение рабочего пространства

4 октября 1957 г. началась космическая эра человечества. Впервые в околоземное пространство был запущен искусственный спутник Земли. Несмотря на

скромные размеры, он воплотил в себе самые передовые достижения советской науки и техники.

Сварочные дела на космодромах. Подготовка к освоению космоса началась задолго до первого запуска искусственного спутника. Большую работу пришлось выполнить проектировщикам и строителям заводов и стартовых площадок. Поработали и сварщики. Об их вкладе можно судить хотя бы по тому, что в космическом центре имени Кеннеди в США был сварен каркас монтажного цеха весом 60 тысяч тонн, высотой 160 метров. Внутри этого цеха размещена платформа, на которой монтируются ракетные комплексы. К платформе приварена огромная башня, ее поддерживают девять наклонных мачт из высокопрочной стали общим весом 4725 тонн. Все ответственные конструкции на стартовой площадке также сварные. Некоторым из них приходится работать в крайне трудных условиях. Удар мощного пламени, вырывающегося из-под ракеты, принимает на себя сварной пламеразделитель весом 650 тонн, высотой 12,7 м. А резервуары для хранения топлива, системы подачи его в баки да и сами топливные баки ракет должны выдержать чрезвычайное переохлаждение. Конструкция их не проста — бак в баке. Точность изготовления высокая, размеры огромны. Емкость резервуара с жидким кислородом — 340 200 литров. Диаметр наружного шара — 21,35 м. Внутренний шар сварен из нержавеющей стали, наружный — из малоуглеродистой стали. Пространство между ними заполнено особой перлитной массой. Аналогично сконструированы и баки для жидкого водорода.

Трубопровод для подачи жидкого водорода сделан из никелевого сплава. Этот трубопровод находится внутри другого трубопровода, изготовленного из алюминиевого сплава. Трубопроводы для подачи

керосина и сверхактивного топлива изготовлены из нержавеющей стали, а трубопровод для подачи жидкого кислорода — из алюминиевого сплава. Легко сказать — «изготовлен». Различные материалы, сотни неповоротных стыков (значит, сварочная ванна будет во всех пространственных положениях). И при всем этом самые высокие требования к качеству сварных соединений. Вот почему, помимо обычного для космической техники сплошного рентгеноконтроля качества шва, обычных гидро- и пневмоиспытаний изделий, их подвергали специальным термическим ударам — быстрым охлаждениям жидким кислородом или азотом. Эти жесточайшие испытания вызваны «нормальными» условиями работы сварных космических конструкций.

Чтобы удовлетворить повышенные требования, сварщики совершенствуют аппаратуру и технологию, создают специальные приспособления. После суровой проверки на ответственной работе многие специально созданные для ракетостроения аппараты и приспособления находят применение и в других отраслях промышленности.

Необычные условия. Ракета-носитель выводит в космос корабль или станцию. В необычных условиях предстоит жить и работать людям. Люди отдадут себя под защиту космического корабля. Но и металлы, пластмассы, другие материалы, из которых сделан корабль, сами подвергаются действию перегрузок, перегреву и другим всевозможным «космическим» процедурам. И даже с самым высококачественным материалом может случиться множество «неприятностей». Не исключено пока повреждение космического корабля метеоритом, другим космическим кораблем.

Можно ли заварить трещину или пробоину в космических условиях? А как сварить из отдельных

блоков большие космические конструкции? Не повлияют ли на сварочные процессы особые, космические условия?

Основные особенности космоса как среды для выполнения сварочных работ заключаются в следующем:

- 1) наличие невесомости;
- 2) существование в окружающем пространстве глубокого вакуума при очень высокой скорости откачки (диффузии) газов и паров из зоны сварки;
- 3) весьма широкий интервал температур, при которых может находиться расплавленный и кристаллизующийся металл.

Как вы уже знаете, некоторые способы сварки и на Земле выполняют в «полукосмических» условиях — в вакууме. К числу таких способов относятся электроннолучевая и диффузионная сварка. При чем диффузионная сварка не связана с расплавлением и свободной кристаллизацией металла, а значит, почти не зависит от невесомости. Более того, схватывание плотно сжатых деталей — явление, подобное диффузионной сварке, — иногда в условиях космоса может произойти и самопроизвольно. Для предотвращения этого явления принимаются даже специальные меры. Однако диффузионная сварка требует очень точной подгонки кромок и усилий для сдавливания деталей.

Поэтому при выборе способов сварки для исследования в космических условиях было решено уделить основное внимание наиболее «неясным» и в то же время наиболее распространенным и надежным способам дуговой, электроннолучевой и контактной сварки. Необходимо было установить, как ведет себя жидкий металл сварочной ванны в условиях невесомости, какую опасность представляют пары металла для космонавтов, для аппаратуры и всего корабля.

Космические условия заставили сварщиков задуматься над многими научными и техническими вопросами. Например, чтобы существовало дуго-плазменное состояние вещества, требуется ионизировать какое-то вещество. А ионизировать нечего — в пространстве между электродом и изделием вакуум. Даже если допустить, что потом, после возбуждения, дуга будет гореть в парах металла, то как быть сначала, в чем и как ее возбудить?

Или, например, при дуговой сварке плавящимся электродом образуются капли, на размер и направление полета которых сильно влияет сила тяжести и сила поверхностного натяжения. В условиях космоса сила тяжести отсутствует, а сила поверхностного натяжения изменяется. Страшно даже представить, что может наделать раскаленная капля металла, свободно летающая по космическому кораблю.

Как управлять плавлением электродного металла? Как измельчить капли? Как направить их точно в ванну?

Коллектив Института электросварки им. Е. О. Патона смог ответить на эти и многие другие вопросы, нашел интересные, оригинальные решения.

Летающая лаборатория. Для проверки и исследований перспективных способов сварки в космосе необходимо было провести тщательные лабораторные исследования. Наиболее сложно было одновременно имитировать вакуум и невесомость. Для этого был создан комплекс оборудования из вакуумных камер, механических форвакуумных и сорбционно-гетерных насосов, сварочной аппаратуры и аппаратуры управления. Осциллографы и скоростные кинокамеры предназначались для регистрации основных параметров режима, поведения ванны и капель. Чтобы получить невесомость, комплекс разместили в самолете, переоборудованном под лабораторию.

Самолет поднимался выше и начинал падать почти до земли. Во время этого свободного падения в течение десятков секунд установка (а вместе с ней и научные сотрудники Института электросварки) оказалась в невесомости. Тридцать секунд невесомости — очень малое время для эксперимента, для познания того, что скрыто за блеском дуги и свечением расплавленного металла. И в течение этой же полминуты экспериментаторы оказывались в состоянии, не самом удобном для работы. Но это еще не все трудности, выпавшие на долю сотрудников лаборатории. По мере расширения программы космических исследований им все больше и глубже приходилось вникать в разнообразные способы сварки, осваивать обилие сложных приборов и аппаратов. Исследовать и разрабатывать сразу несколько способов сварки!

Эксперименты в летающей лаборатории обогатили сварочную науку интересными наблюдениями. Обширные и разносторонние исследования позволили установить наиболее характерные особенности различных способов нагрева и сварки (электронно-лучевого, плазменного, дугового, гелиосварки и т. д.). Но некоторые эксперименты в летающей лаборатории до конца провести не удалось. Только первые секунды с начала сварки существовал в камерах глубокий вакуум, а потом они наполнялись таким количеством газов и паров, что насосы не успевали их откачивать. Но в самолете нельзя было поставить достаточно большую камеру и более мощные насосы. Коротким оказалось и время искусственной невесомости — металл объемом свыше 10—15 мм³ уже не успевал закристаллизоваться за это время, и изучить до конца процессы формирования шва оказалось чрезвычайно сложно.

Тем не менее предварительные эксперименты в летающей лаборатории дали ценный научный материал, без которого нельзя было спроектировать спе-

циальную установку для сварки в условиях околоземного космоса. «Вулкан» — так было названо комплексное автоматическое устройство, смонтированное сотрудниками Института электросварки на космическом корабле «Союз-6».

Сварка в космосе. 16 октября 1969 г. летчики-космонавты космического корабля «Союз-6» Г. С. Шонин и В. Н. Кубасов впервые в мире выполнили сварку в космосе. На установке «Вулкан» были последовательно сварены образцы из различных материалов плазменной дугой, дугой с плавящимся электродом и электронным лучом. Одновременно был испытан и способ разделительной резки электронным лучом.

Лучше всех протекал процесс сварки электронным лучом. Для нормального формирования сварного соединения космические условия не стали препятствием.

Режим сварки (сила тока, напряжение дуги) плавящимся электродом остался таким же, как и при сварке на Земле. Неплохо плавился соединяемый металл, и образовавшийся шов был плотный, без газовых и шлаковых включений. Неожиданно поразному стала вести себя дуга в двух различных способах дуговой сварки. При сварке плавящимся электродом длительный устойчивый дуговой разряд существовал в парах материала электрода. Для создания дуги с неплавящимся электродом был испытан вариант плазменной сварки — через узкий канал сопла подавался газ, в котором и должна была гореть дуга. Но этот газ мгновенно рассеивался сразу же на выходе из сопла, концентрация его в дуговом промежутке оказалась недостаточна для того, чтобы получить сжатую дугу и добиться стабильного плавления кромок.

Летом 1973 г. эксперименты по сварке были про-

ведены на станции «Скайлэб» американскими астронавтами.

Первые шаги сварки в космосе дали обнадеживающие результаты. Многое удалось выяснить, но... еще больше возникло неясностей. Так, например, из-за невесомости изменяются условия разделения жидкой, твердой и газообразной фаз в зоне сварки, а значит, необходимы дополнительные меры, чтобы предотвратить поры и включения в швах. Огромная разница в температурах близкорасположенных участков (космический холод и рядом нагрев до плавления) вызовет чрезмерные деформации и напряжения. Большие трудности возникают и при создании сварочной аппаратуры, от которой требуется высокая надежность и безопасность, минимальная масса и максимальная мощность и еще многое другое.

И это, конечно, не все проблемы, и, вероятно, даже не самые основные. Они будут возникать с каждым новым шагом человека в космическое пространство.

Приглашение на подводную работу. На фоне выдающегося события первой космической сварки остался незамеченным другой, менее эффектный, но очень перспективный и очень важный для человечества эксперимент. В 1970 г. на дне реки Днепра в районе города Днепропетровска на десятиметровой глубине впервые в мировой практике была осуществлена полуавтоматическая сварка прочноплотным швом стального трубопровода высокого давления.

В принципе подводная дуговая обработка металлов — резка и сварка — известна около 100 лет. В 80-х гг. прошлого века русский физик-электротехник Д. А. Лачинов разрезал дугой стальные пластины, погруженные в воду. Удачные эксперименты по резке и сварке под водой провел и Н. Н. Бенардос.

В годы Великой Отечественной войны подводная электродуговая сварка и резка штучными электродами с влагонепроницаемой обмазкой стала широко применяться для ремонта многочисленных повреждений подводных частей кораблей и разрушенных мостов, при аварийных и спасательных работах на флоте. Но это был ручной, полукустарный способ ремонта. Таким он и оставался еще почти три десятилетия — в крупных сварочных работах под водой особой потребности не было.

В течение нескольких столетий мировой океан служил дорогой, связывающей страны и континенты. В настоящее время он приобретает существенное значение и как потенциальный источник пищи, энергии, минеральных ресурсов, а также как территория для размещения промышленных предприятий. Возрастает мировая добыча нефти и газа на континентальном шельфе, где скважины размещают на глубинах до 200 м. Стальные свайные основания для буровых платформ, глубинные трубопроводы большого диаметра, подводные нефтехранилища, обитаемые и необитаемые подводные станции стали уже реальностью. Существуют проекты атомных плавающих в море электростанций и даже целых городов. Богатые залежи марганцевых и ферромагнитных конкреций, находящиеся на дне океана, могут стать важнейшим источником металлов. Для этого придется перерабатывать их на месте добычи на автоматизированных предприятиях.

Конечно, все конструкции, допускающие изготовление в надводном положении, рационально сваривать до погружения. Но и подводной сварке останется огромный объем работ при монтаже металлических конструкций, их ремонте, реконструкции.

Сварщики в различных странах мира накапливают опыт подводных работ, ищут научные решения

многочисленных проблем. Уже сейчас подводная сварка нашла большое применение при строительстве мостов, портовых сооружений, буровых платформ, эстакад, подводных трубопроводов и др. Разработаны два метода сварки, которые условно называют **сухой** и **мокрый**.

Чем глубже, тем больше проблем. При «сухом» методе в месте проведения сварочных работ устанавливают и закрепляют обитаемую камеру, открытую снизу. В эту камеру подают сжатый воздух (или смесь газов), который вытесняет воду и освобождает место ремонта. Процесс сварки в таких условиях почти не отличается от обычной сварки на суше, но метод этот очень дорог и имеет ограниченные возможности — не ко всякому подводному сооружению удастся «подобраться» с камерой.

«Мокрый» метод более экономичен, прост и универсален. Однако непосредственное окружение зоны сварки водой не проходит бесследно ни для процесса сварки, ни для качества шва.

Что же происходит при сварке под водой? Какие проблемы возникли?

При соблюдении условий подготовки и сварки (не очень отличающихся от обычных) дуга под водой горит устойчиво и обладает всеми своими нормальными свойствами. Хотя дугу и окружает вода, горит она непосредственно в газовом пузыре, образующемся в результате испарения и разложения воды. Устойчивое горение дуги объясняется принципом минимума энергии, проявляющемся так же, как и при формировании сжатой плазменной дуги. Усиление охлаждения столба дуги приводит к более интенсивному выделению энергии, что компенсирует возросшую ее потерю. Выражается это в повышении напряжения.

С увеличением глубины погружения возрастает

и давление в зоне сварки. Как при «мокром», так и при «сухом» методах из-за этого изменяется кинетика и равновесие химических реакций в сварочной ванне. Но составы флюсов, обмазок, проволок рассчитаны на «работу» при нормальном давлении. Значит, возникает риск обеднить ванну каким-либо веществом или, наоборот, ввести лишние вещества. Естественно, чем выше давление, тем больше растворяется в металле кислорода и водорода. С повышением давления в зоне сварки увеличивается и глубина проплавления.

Мы не будем останавливаться на других научных, технологических и конструкторских проблемах и особенностях подводной сварки. В СССР, в США, Японии, Великобритании, Франции и ряде других стран сварке под водой уделяют серьезное внимание. Уже проведено много исследований, разработаны технологические процессы сварки дугой (в углекислом газе, в аргоне, в смеси газов, лежащим штучным электродом), взрывом и электронным лучом. Сконструированы горелки с водяной завесой, сохраняющей газовый пузырь в зоне сварки.

В Институте электросварки им. Е. О. Патона создан специальный полуавтомат для сварки электродной проволокой, и сварщик-водолаз получил возможность работать без перерывов на закрепление нового электрода. Одновременно разработана и особая, электродная проволока, обеспечивающая необходимый состав и свойства металла шва.

Трудно переоценить значение этого достижения советских сварщиков в реализации грандиозных планов освоения морей и океанов. На смену сварщику-ручнику пришел оператор, вооруженный удобным портативным аппаратом, который обеспечивает получение на больших глубинах соединений, полностью отвечающих даже наиболее высоким требованиям земных технических условий.

Однако это только первые, хотя и важные, успехи. Время основных проблем сварки под водой и их решения еще не наступило.

Робот-сварщик в космосе и под водой

Большая роль в освоении космоса и океанских глубин отводится полуавтоматическим устройствам, управляемым человеком, и автоматическим устройствам, действующим автономно.

А как же быть со сваркой? Кто или что будет выполнять сварку?

Полностью и окончательно ответить на этот вопрос пока нельзя — необходимы серьезные исследования этой проблемы. Но вероятнее всего сварщикам придется создавать специальные роботы.

Какими они будут?

Пока что мы можем представить их себе в общих чертах.

Для ликвидации метеоритных повреждений нужны специальные ремонтные работы. Им должна быть доступна любая точка на поверхности космической станции. Датчики-течеискатели обнаружат пробой, обследуют его и передадут соответствующие данные на бортовую ЭВМ, которая рассчитает и подготовит программу работы. Робот, получив команду, направится к месту повреждения и приступит к делу. При желании человек будет следить за сваркой с помощью телевизионной системы.

Роботы должны иметь возможность перемещаться по всей поверхности по соответствующим направляющим, выходя на них из своих ангаров.

Но в космосе, в условиях невесомости, так просто робот двигаться не может. Он оторвется от поверхности станции, за исключением тех редких случаев, когда на ней будет создана искусственная гравита-

ция. Малоперспективно применение магнитных опор — «космические» сплавы в основном немагнитные. Исключено применение и вакуумных присосов.

Возможно, на поверхности свариваемых космических изделий необходимо будет предусмотреть специальные технологические выступы, которые могут быть использованы для удержания и движения робота. Возможны и другие, пока еще не найденные варианты.

При изготовлении и реконструкции космических станций и кораблей потребуется, вероятно, другой тип роботов. Так как порядок операций разрабатывается заранее, то и последовательность сборки в космосе можно задать и запрограммировать еще на Земле. Бортовая ЭВМ нужна будет только для того, чтобы вносить в работу робота необходимые коррективы. А когда сооружение станции закончится, робот-строитель вернется на базу.

Много серьезных научно-технических проблем необходимо преодолеть прежде, чем удастся создать космического робота-сварщика. Такой робот должен иметь достаточно мощный источник питания, обладать развитой системой приема внешней информации, позволяющей отыскать объект сварки, правильно ориентировать рабочий орган (электрод или электроннолучевую установку) относительно изделия и контролировать ход процесса сварки. Система управления такого робота должна обеспечивать не только перемещение рабочего органа в пространстве по заданной и желаемой траектории, но и управление всем циклом и параметрами режима сварки.

Сварщикам придется создавать и «подводного» робота-сварщика. Здесь также появляются новые проблемы — и общие с космическими, и свои, вызванные особенностями среды. Трудностей с перемещением как будто не предвидится. Можно легко создать

нулевую плавучесть и без труда плавать рядом с изделием. Для передвижения по вертикали достаточны сравнительно простые средства, управляющие величиной архимедовой силы. Нетрудно закрепить — для этого пригодны устройства, использующие силу гравитации, или вакуумные присосы.

Однако под водой особенно на больших глубинах, человек должен находиться в толстенном снаряде, защищающем его от гидростатического давления воды. Непосредственно контактировать с окружающей средой сварщик-водолаз не может, движения его стеснены водолазным снаряжением. Неустойчивое положение и плохая видимость затрудняет работу, а на глубине человек вообще теряет работоспособность. Даже такая простейшая задача, как приварка к затонувшим судам проушин для крепления стропов, при глубинах немногим более 100 м, становится неразрешимой. Здесь необходим автомат-сварщик. Он должен найти соответствующее место на судне, зачистить от краски и ржавчины, сориентировать и прижать проушину и, наконец, приварить ее к судну прочным швом. Такую работу, а также сварку предварительно состыкованных трубопроводов, металлоконструкций из стандартных деталей смогут вести и роботы первого поколения с жесткой программой, если их немного усовершенствовать.

Более 95 % океана имеет глубины, недоступные водолазам. Поэтому в будущем сборочно-сварочные работы придется выполнять подводным автономным роботам, получающим инструкции с базы. Здесь сварщикам предстоит большая исследовательская работа по созданию методов и средств глубоководной сварки.

Нашей задачей было рассказать о сущности сварочной науки и об успехах сварочной техники. Мы не имели возможности рассказать вам о людях, благодаря которым были достигнуты успехи в области сварки, — об ученых и рабочих, инженерах, техниках и лаборантах. Их много, все они разные, но всех их объединяют и общие черты характера, позволившие им стать творцами нового в технике, разведчиками будущего в этой области человеческого знания.

Какими же качествами должен обладать новатор? Трудолюбием, глубокими знаниями, широким кругозором и практическим умением, смелостью дерзания — без них невозможно внести сколько-нибудь заметный вклад в прикладную науку на современном уровне ее развития.

А главное — он должен горячо любить свое дело. Об этом качестве новатора Алексей Александрович Улесов, дважды Герой Социалистического Труда, рабочий-электросварщик, разработавший и внедривший ванный способ дуговой сварки, сказал так: «Любить свою профессию — значит творчески относиться к своей работе, быть страстным поборником всего того, что увеличивает производительность труда, удешевляет продукцию, облегчает труд». Готовиться к творческой, новаторской работе, приобретать знания, вырабатывать в себе соответствующие качества необходимо уже в школьные годы.



Огонь сшивает металл

*Борис Евгеньевич
Патон
Александр
Николаевич
Корниенко*

Для среднего и старшего
школьного возраста

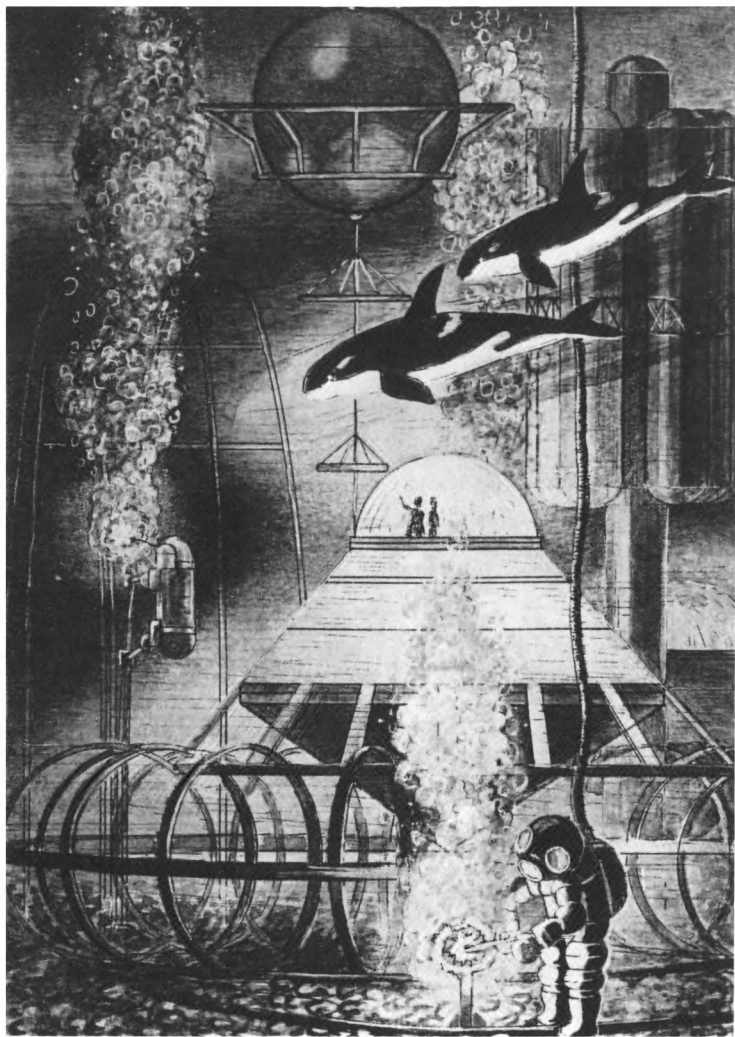
Художник
Радаев В. Д.

Фото
Миргорода В. П.

Заведующий
редакцией
В. Ю. Кирьянов
Редактор
Т. П. Ляхова
Художественный
редактор
В. П. Храмов
Технические
редакторы
И. И. Володина,
И. Б. Пономаренко
Корректор
В. Н. Рейбекель
ИБ № 430
Сдано в набор 02.01.79.
Подписано в печать
03.12.79. А04058.
Формат 70×100/32.
Бумага офсетная № 1.
Офсетная печать.
Усл. печ. л. 5,16.
Уч.-изд. л. 5,73.
Тираж 200 000 экз.
Заказ № 60.
Цена 30 коп.
Издательство «Педаго-
гика» Академии педа-
гогических наук СССР
и Государственного ко-
митета СССР по делам
издательств, полигра-
фии и книжной тор-
говли.
Москва, 107847, Ле-
фортовский пер., 8.
Ордена Трудового
Красного Знамени
Калининский
полиграфический ком-
бинат Союзполиграф-
прома при Государст-
венном комитете СССР
по делам издательств,
полиграфии и книжной
торговли.
г. Калинин, пр. Лени-
на, 5.

Содержание

- 3 Введение
- Из истории техно-
- 5 логии соединений
- Самый распрост-
- раненный источ-
- 20 ник тепла
- Дуга встречается
- 29 с металлом
- Сварка «портит»
- 38 металл
- Автоматизация
- 53 сварки
- Победа автомати-
- 59 ческой сварки
- Сварка на строи-
- 70 тельных объектах
- и в цехах
- Покорение метал-
- 83 лов и сплавов
- В авангарде науч-
- но-технической
- 102 революции
- Расширение рабо-
- чего пространст-
- 113 ва
- Робот-сварщик
- в космосе и под
- 124 водой
- 125 Заключение



**Читайте
следующую
книгу
библиотечки**

**«Ученые —
школьнику!»**

Что вы знаете о полетах искусственных спутников?

Множество спутников совершает полет вокруг нашей планеты. Их уносят в космос ракеты, как и многие другие посланные человеком автоматические аппараты. Сердце ракеты — мощный двигатель. Питается он жидким или твердым топливом.

А знаете ли вы, почему предпочтение отдается жидкому топливу?

Известно ли вам, что существуют совсем крохотные ракетные двигатели?

Некоторые из них могут уместиться на ладони.

Как устроен космический корабль?



А как дышат в космосе космонавты?

Ведь в космосе дыхание становится проблемой.

Как управляют с Земли космическими полетами?

Ведь на Земле обитатели космического корабля не только слышат, но и видят.

А что вы знаете об орбитальных и межпланетных станциях?

Знакомы ли вы с результатами современных исследований в области астрофизики и космологии?

Обо всем этом вам расскажет увлекательная книга Ю. Н. Глазкова, Ю. В. Колесникова «На орбите космический корабль».

**ИЗДАТЕЛЬСТВО
«ПЕДАГОГИКА»**