

М.И. Баранов

## АНТОЛОГИЯ ВЫДАЮЩИХСЯ ДОСТИЖЕНИЙ В НАУКЕ И ТЕХНИКЕ. ЧАСТЬ 17: ИЗОБРЕТЕНИЯ В СВАРКЕ МАТЕРИАЛОВ

*Наведено короткий нарис з всесвітньої історії винаходу людством основних технологій зварювання металів і інших матеріалів.*

*Приведен краткий очерк из всемирной истории изобретения человечеством основных технологий сварки металлов и иных материалов.*

*"Без научных школ не будет науки.  
Без науки не будет и техники..."  
(из речи выдающегося ученого  
современности, президента НАН  
Украины Б.Е. Патона, 2012 год)*

### ВВЕДЕНИЕ

С появлением металлургии [1] у землян стали зарождаться и первые примитивные на начальном этапе способы (технологии) соединения частей изделий из выплавленных металлов и полученных сплавов. Согласно [2] история соединения металлов при помощи **сварки** насчитывает несколько тысячелетий и уходит своими глубокими "корнями" в период "железного" века. Отметим, что под термином "сварка" в настоящее время понимается "технологический процесс получения неразъемного соединения посредством установления межатомных и межмолекулярных связей между свариваемыми частями изделия путем их местного (общего) нагрева или пластического деформирования" [3]. В Британском историческом музее (г. Лондон) хранятся образцы древнего холодного оружия, изготовленного в странах Средиземноморья еще примерно за 1000 лет до н. э. с применением сварки железа [4]. Другие артефакты раннего искусства сварных работ находятся в исторических музеях Северной Америки (г. Филадельфия и г. Торонто) [4]. Самым крупным швом от сварки в древней истории считается сварной шов, выполненный на железном индийском столбе весом 5,4 т (г. Дели), построенном около 310 года н. э. [1, 4]. За многие столетия видными специалистами всего мира в области сварочного дела было сделано большое количество открытий и изобретений, относящихся к сварке различных материалов. Сейчас сварка металлов стала в мире одним из основных видов металлообработки и заняла важнейшее место в таких современных наукоемких промышленных отраслях как машиностроение, судостроение, нефте- и газодобыча (с хранением и поставкой на дальние расстояния этих природных горючих продуктов), транспорт и энергетика. Огромный научно-технический вклад в создание прогрессивных промышленных технологий сварки технических изделий общегражданского и военного назначения внесли ученые из России и Украины. В этой связи определенный интерес как для сформировавшихся специалистов технической сферы, так и студентов высших технических заведений наших стран представляет краткое рассмотрение всемирной истории становления и развития технологий сварки основных металлов и ряда неметаллов.

### 1. ПЕРВЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ В СВАРКЕ МЕТАЛЛОВ

Первым и долго применявшимся людьми видом сварки стала **кузнечная сварка**. При этом виде сварки соединение материалов осуществляется за счёт возникновения межатомных связей при их нагреве и пластическом деформировании ковочным инструментом. В настоящее время она практически не используется.

В мае 1802 года выдающимся российским физиком, профессором Василием Владимировичем Петровым (рис. 1) в одном из лучших на то время в России физических кабинетов Санкт-Петербургской медико-хирургической академии в двухэлектродной системе вначале с металлическими и затем с угольными электродами, подключенными к обоим полюсам созданной им мощной электрической батареи (рис. 2), состоящей из 2100 гальванических элементов с медными и цинковыми кружками, было опытным путем открыто явление **электрической (вольтовой) дуги** [5, 6].



Рис. 1. Выдающийся российский электрофизик В.В. Петров (1761–1834 гг.), открывший явление электрической дуги [8]



Рис. 2. Схема опытов В.В. Петрова, приведших к открытию им в 1802 году в России электрической вольтовой дуги [8]

При этом ставший позже (в 1807 году) академик Петербургской Академии наук В.В. Петров в полученных им тогда оригинальных опытных результатах по данной дуге указывал, что появляющийся между угольными электродами "белого цвета свет или пламя, от которого оные угли скорее или медлитель-

© М.И. Баранов

нее загораются и от которого тёмный покой довольно ясно освещён быть может" [7]. Первооткрыватель вольтовой дуги в своих научных трудах (1803 год) указывал на возможность ее практического применения для освещения помещений, плавки и соединения (сварки) металлов [8,9]. Однако великое открытие вольтовой дуги значительно опередило свое время. К моменту открытия дугового электрического разряда электротехника в мире только начинала создаваться. Электротехнической промышленности еще не было. Отсутствовали необходимые источники электропитания, коммутационная аппаратура, провода и кабели.

Эти пророческие предсказания В.В. Петрова были реально осуществлены лишь в 1881 году известным украинско-российским электротехником Николаем Николаевичем Бенардосом (рис. 3), изобретшим *электродуговую сварку* металлов с применением угольных электродов, названную им "электрогефестом" [10]. Это изобретение стало главным экспонатом Парижской международной электротехнической выставки в 1881 году и получило на ней золотую медаль. По возвращении с данной выставки в г. Санкт-Петербург Н.Н. Бенардос активно продолжил совершенствовать изобретённый им способ дуговой электросварки металлов. После доведения своего способа электрической сварки металлов до возможности его промышленного применения он 31 декабря 1886 года получил российскую десятилетнюю привилегию (патент) № 11982 на "Способ соединения и разъединения металлов непосредственным действием электрического тока" [10]. После появления у Н.Н. Бенардоса необходимых денежных средств этот способ электросварки металлов был им запатентован в ведущих промышленно развитых странах мира. Финансовую помощь в этом вопросе оказывал ему купец С.А. Ольшевский, ставший совладельцем этих патентов [10].



Рис. 3. Известный украинско-российский электротехник Н.Н. Бенардос (1842-1905 гг.), изобретший в 1881 году в России дуговую электрическую сварку металлов [10]

На рис. 4 приведена графическая часть французского патента №363320 от 17 мая 1887 года Н.Н. Бенардоса и С.А. Ольшевского на способ дуговой электросварки металлов "Электрогефест" [10]. В данном патенте было указано, что заявленный способ основан на непосредственном образовании вольтовой дуги между местом обработки металла, составляющим один электрод, и подводимой к этому месту обработки рукояткою, содержащей другой электрод и соединенной с соответствующим полюсом источника элек-

трического тока (см. рис. 4). В описании изобретения было отмечено, что с помощью этого способа сварки могут быть выполнены следующие виды работ: соединение металлических частей между собой, разъединение или разрезка различных металлов на части, производство отверстий и полостей разных форм в металлических изделиях и наплавление металла отдельными слоями [10]. Укажем, что уже к 1888 году способ дуговой электросварки металлов получил большое распространение по всему миру, а имя изобретателя из России Н.Н. Бенардоса стало известным в научных и инженерно-технических кругах за границей. Всестороннее освещение нового технологического процесса сварки металлов в технической литературе и в научно-технических докладах видных учёных и инженеров на зарубежных конференциях также способствовало росту популярности выдающегося изобретения Н.Н. Бенардоса. К середине 1890-х годов электротехнологический процесс сварки металлов нашего соотечественника был внедрён более чем на 100 крупных заводах Западной Европы и США [10].

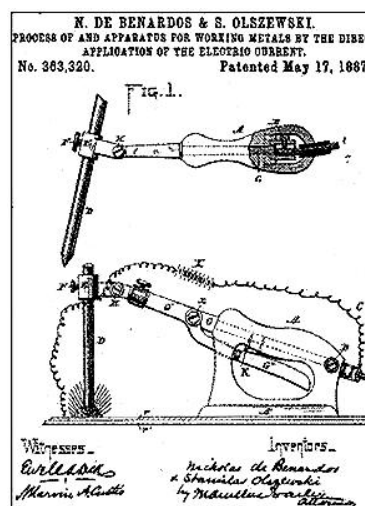


Рис. 4. Чертежи патента Франции № 363320 от 17 мая 1887 года на способ электрической сварки металлов "Электрогефест", выданного Н.Н. Бенардосу и С.А. Ольшевскому [10]

В этот период электросварку начали применять не только для вспомогательных ремонтных работ, но и как основной технологический процесс производства новых металлических изделий. В России дуговую электросварку Н.Н. Бенардоса впервые применили на Куваевской мануфактуре и машиностроительном заводе в г. Иваново-Вознесенске [10]. В 1888 году способ дуговой электросварки Н.Н. Бенардоса был использован в Рославльских мастерских Орловско-Витебской железной дороги для ремонта паровозных и вагонных колёс, рам, решёток и др. К середине 1890-х годов эффективный способ сварки Н.Н. Бенардоса распространился по всей России. Уже к 1892 году Н.Н. Бенардос разработал электрическую сварку как с угольным, так и с металлическим электродами. Ему принадлежит техническая идея и разработка аппарата для электросварки металлическим электродом на переменном токе, разработка сварки электроотокком в струе газа и электросварки наклонным электродом.

Он первым в мире начал применять в активной зоне сварки различные флюсы и закрытую электрическую дугу, а также был основоположником механизации и автоматизации электросварочного процесса [10]. За "удачное применение вольтовой дуги к спаиванию металлов и направлению одного металла на другой" Н.Н. Бенардос 11 мая 1892 года был удостоен высшей награды Русского Технического общества – золотой медали [10]. Н.Н. Бенардосу вместе с такими прославившимися российскими изобретателями как А.С. Поповым и А.Н. Лодыгиным 7 декабря 1899 года Санкт-Петербургским электротехническим институтом за особо выдающиеся заслуги в области электротехники было присвоено звание почётного инженера – электрика [10]. При этом сделанная запись в журнале заседаний Ученого совета института гласила [10]: "А.С. Попов, Н.Н. Бенардос и А.Н. Лодыгин заслуживают возведения в звание почётного инженера – электрика как выдающиеся русские изобретатели в области электротехники, первый – по телеграфированию без проводов, второй – по электрической сварке металлов и третий – по устройству лампы накаливания". В ознаменование 100-летия изобретения электросварки в России в бывшем СССР в 1981 году была выпущена юбилейная почтовая марка (рис. 5).



Рис. 5. Юбилейная почтовая марка СССР, выпущенная в 1981 году к 100-летию изобретения Н.Н. Бенардосом в России электрической дуговой сварки металлов [10]

Практически одновременно с Н.Н. Бенардосом работал другой крупный российский изобретатель – Николай Гаврилович Славянов, много сделавший для развития дуговой электросварки. В 1888 году инженер Н.Г. Славянов (рис. 6) впервые в мире применил на практике дуговую *электросварку* металлическим (плавящимся) электродом *под слоем флюса* [11].



Рис. 6. Известный российский инженер-изобретатель в области электрической дуговой сварки металлов под защитным слоем флюса Н.Г. Славянов (1854-1897 гг.) [11]

Своё изобретение Н.Г. Славянов назвал "Электрической отливкой металлов" (российский патент на него ему был выдан в 1891 году) [11]. Для демонстрации ре-

альных возможностей сварочного аппарата, созданного Н.Г. Славяновым, он прямо перед государственной комиссией, прибывшей из г. Санкт-Петербург в 1888 году на Пермский казенный пушечный завод, сварил восемь несплавлявшихся ранее металлов и сплавов [11]: кобальтовую бронзу, томпак, никель, сталь, чугун, медь, нейзильбер и оружейную бронзу.

Н.Г. Славянов при выполнении дуговой сварки отказался от громоздкой аккумуляторной электробатареи Н.Н. Бенардоса и впервые применил в качестве источника электропитания разработанную им динамомашину на ток до 1 кА. Он создал первый в мире сварочный электрогенератор [11]. На Всемирной электротехнической выставке в 1893 году в г. Чикаго (США) Н.Г. Славянов за изобретенную им технологию электросварки под слоем флюса (толченого стекла) получил золотую медаль с такой формулировкой [11]: "За произведённую техническую революцию".

В 1901 году выдающийся российский учёный-электротехник, профессор Петербургского политехнического института, будущий академик АН СССР (с 1929 года) Владимир Фёдорович Миткевич (рис. 7) для преобразования переменного электрического тока в постоянный разработал схемы однофазного двухполупериодного выпрямителя (двухполупериодный с двумя обмотками) и трёхфазного однополупериодного выпрямителя (однополупериодный с нулевым выводом) [12]. С учетом результатов этих исследований в 1905 году русский электрофизик В.Ф. Миткевич впервые в мире предложил применить трёхфазную электрическую дугу для сварки различных металлов.



Рис. 7. Выдающийся российский электрофизик, академик АН СССР, лауреат Государственной премии СССР (1943 год) В.Ф. Миткевич (1872-1951 гг.), изобретший в 1905 году в России трехфазную дуговую электросварку металлов [12]

Он показал, что при питании сварочной дуги переменным током новый потенциал между электродами должен подаваться раньше, чем распадется плазма в рабочей зоне. В связи с этим скорость нарастания напряжения источника питания должна была быть больше, чем скорость деионизации дугового промежутка. Предложенные им электрические схемы легли в основу дуговой *электросварки на переменном токе* [12]. Попытку создать удобный метод дуговой электросварки в конце 19-го века предприняли немецкий электротехник Г. Ценерер и будущий основатель в США фирмы "Дженерал электрик" Ч. Коффин. В их методе образовавшаяся дуга между угольными электродами с помощью магнита отклонялась в сторону места сварки металла. Предложенный ими процесс сварки, названный "Электрической паяльной трубкой", был сложен и

поэтому он не нашел применения на практике [13]. В 1927 году украинский изобретатель Д.С. Дульчевский, работавший в Одесских железнодорожных мастерских, используя технические идеи российского изобретателя Н.Г. Славянова, разработал первый автомат для сварки под флюсом [13]. Над проблемой дуговой электросварки оголенным электродом с отдельной подачей флюса к дуге работали как в нашей стране, так и за рубежом. В начале 1930-х годов в США был построен завод по производству сварных труб с помощью автоматической дуговой сварки с использованием флюса. В 1934 году американская фирма "Дженерал электрик" использовала для автоматической сварки оголенной проволокой флюс, предложенный В. Миллером и состоящий из полевого шпата и диоксида титана. Измельченные в порошок компоненты смачивали водой и в виде пасты наносили на изделие перед сваркой. В 1936 году ими был получен патент на способ автоматической дуговой электросварки под флюсом, названный "Юнионмелт". Этим способом сваривали стальные листы толщиной до нескольких десятков миллиметров со скоростью до 10 м/ч. Дуговая электросварка и резание металлов с помощью постоянного и переменного токов стали в наше время одними из самых важных современных технологических процессов. Н.Н. Бенардоса справедливо считают "отцом" или родоначальником дуговой электросварки металлов [3, 10].

Широкому распространению в конце 19-го и начале 20-го веков способа сварки металлов, имеющего в качестве источника их нагрева электрическую энергию, препятствовало ряд объективных причин. Электроэнергия тогда была еще дорогой, а используемое электрооборудование было достаточно громоздким и недостаточно мобильным. Удовлетворительное качество сварных металлоконструкций обеспечивалось высокой трудоемкостью сварочного процесса и необходимостью привлечения к нему кадров высокой квалификации. Поэтому не случайным в это время является поиск и разработка способов соединения и разъединения металлов, основанных на использовании теплоты химических реакций [13]. В 1850 году во Франции С.К. Девиль создал горелку для водородно-кислородного пламени, в которой эти газы смешивались в специальной камере до выхода наружу в зону сварки металлов. Пламя такой горелки имело температуру до 2600 °С и могло расплавить платину, золото и серебро [13]. К 1860 году учеными-химиками был изучен такой новый горючий газ как ацетилен, температура пламени которого в смеси с кислородом достигала до 3200 °С. В 1887 году впервые в мире было произведено прожигание разных отверстий в металле газовым пламенем. В 1895 году французский ученый А. Шателье установил, что ацетилено-кислородное пламя (рис. 8) имеет не только высокую температуру, но и не окисляет расплавленное железо. Применение в сварочном деле указанных газов позволило, в конце концов, изобрести *газовую сварку* металлов и сплавов.

Заметим, что в последние годы при выполнении сварочных работ в качестве заменителя ацетилена стал применяться новый вид горючего газа – сжиженный газ МАФ (метилацетиленовая фракция) [13]. МАФ обеспечивает высокую скорость сварки и высокое качество сварочного шва, но требует применения присадочной проволоки типа СВ08ГС или СВ08Г2С с по-

вышенным содержанием марганца и кремния. Газ МАФ удобнее при транспортировке, более безопасный чем ацетилен и в два-три раза дешевле последнего.



Рис. 8. Газовая пайка (сварка) металлов (а) при помощи ацетилено-кислородного пламени (б), имеющего на расстоянии 3 мм от своего ядра температуру около 3150 °С [13]

Благодаря высокой температуре пламени сгорания в среде кислорода горючего газа МАФ (до 2930 °С) и высокому тепловыделению (до 20800 ккал/м<sup>3</sup>), газовая резка с использованием МАФ гораздо эффективнее резки с использованием других газов, в том числе и ацетилена [13]. В настоящее время огромный интерес представляет использование для газопламенной сварки (резки) металлов такого газа как дициан, имеющего очень высокую температуру сгорания в кислороде (до 4500 °С). Препятствием к расширенному применению дициана для сварки и резки металлов является его повышенная токсичность. Эффективность пламени дициана сравнима с вольтовой дугой. Потому, по мнению специалистов, дициан представляет большую перспективу для дальнейшего прогресса в развитии газопламенной обработки металлов [13]. Отметим, что определенную перспективу в развитии газопламенной обработки материалов имеет ацетилендинитрил и его смеси с углеводородами ввиду наиболее высокой температуры их сгорания (до 5000 °С). Сейчас производство газа ацетилендинитрил ограничено, стоимость его высока и поэтому этот газ редко применяется при сварке (резке) металлов [13].

В конце 19-го века при практическом использовании сварки выявилась серьезная проблема, связанная с соединением металлических элементов, имеющих большие площади поперечного сечения (например, рельсов и массивных балок). Электродуговым способом Н.Н. Бенардоса и ацетилено-кислородной сваркой за один проход можно было выполнять сварные швы высотой до (3-5) мм. При многослойной сварке в ее швах накапливались металлоструктурные дефекты. Контактная сварка была тогда слабощной. В 1850-е годы крупным российским ученым-химиком Николаем Николаевичем Бекетовым был открыт новый способ получения металлов путем восстановления их оксидов с помощью алюминия [14]. В своей докторской диссертации "Исследования над явлениями вытеснения одних металлов другими" он показал, что шихта из смеси порошков алюминия и оксида железа, засыпанная в тигель и подожженная, горит при температуре в несколько тысяч градусов Цельсия и превращается в железо и шлак. Здесь же он установил, что вместо алюминия можно было использовать магний, а из оксидов можно восстанавливать и такие другие металлы как хром, титан и бор. Дан-

ное физико-химическое явление и было использовано специалистами-сварщиками для создания нового способа соединения металлов, получившего название *термитной сварки* [14]. При этой сварке нагрев соединяемых частей изделия осуществляется энергией, выделяющейся при горении термитной смеси – смеси порошков алюминия (или магния) и оксидов металлов (главным образом железа). В изобретение термитной сварки большой вклад внес такой представитель немецкой научной школы химиков как Г. Гольдшмидт, впервые осуществивший с помощью аллотермии в 1898 году качественное сварное соединение двух толстых железных брусков [13]. Им же позже за счет применения для холодной термитной шихты запала из пероксида бария был преодолен и основной недостаток аллотермии – плохая управляемость процесса зажигания термитной смеси. Термитная сварка оказалась наиболее выгодной для соединения металлических деталей с площадью поперечного сечения более 500 мм<sup>2</sup> [14]. Преимущества термитной сварки (портативность оборудования и технологических приспособлений, возможность соединения крупных металлозаготовок на месте и использования полученного изделия сразу после его сварки) были быстро оценены на железнодорожном транспорте при соединении стальных рельсов, поломанных тяг и штоков паровозов [15]. Затем ее начали широко применять в судостроении (при ремонте массивных валов дизельных двигателей, гребных винтов и якорей), машиностроении (при изготовлении крупногабаритных рам, оснований и ступиц) и в других областях техники [16].

## 2. ДОСТИЖЕНИЯ СССР В СВАРКЕ МЕТАЛЛОВ

Яркую страницу в советскую историю сварочного дела вписал выдающийся отечественный ученый, академик АН УССР Евгений Оскарович Патон (рис. 9) [17]. До работ в области сварки металлов он являлся известным специалистом по вопросам статистики технических сооружений и конструирования железных мостов. К концу 1920-х годов им были сформулированы основные научно-технические принципы расчёта и построения клёпаных металлических мостов [17].



Рис. 9. Выдающийся украинский ученый, Герой Труда (высокое звание присвоено в 1943 году), академик АН УССР (с 1929 года) Е.О. Патон (1870-1953 гг.), стоявший у истоков создания основных технологий сварки металлов в СССР и их внедрения в промышленное производство страны [17]

В 1929 году исследования сварных соединений и металлоконструкций были активно развернуты в г. Москве под руководством профессора Г.А. Николаева и академика АН УССР Е.О. Патона в г. Киеве. Поэтому

этот год можно считать знаменательным в становлении сварочной науки в СССР. В это время в г. Москве организуется автогенно-сварочный техникум, который вскоре преобразуется в учебный комбинат, положивший начало многим кафедрам в Московском высшем техническом училище (ныне в Московском государственном техническом университете) им. Н.Э. Баумана. Тогда же в г. Киеве при АН Украины создается первая электросварочная лаборатория. Ее организатором и руководителем был крупный инженер и ученый в области мостостроения, академик АН УССР Е.О. Патон [17]. Именно с 1929 года Е.О. Патон начинает заниматься вопросами электросварки. В 1934 году указанная электросварочная лаборатория была преобразована в первый в мировой практике научно-исследовательский институт, занимающийся только вопросами сварки – Институт электросварки (ИЭС) АН УССР. Всю свою оставшуюся творческую жизнь он активно посвятил в стенах возглавляемого им ИЭС АН УССР разработке научно-технических основ сварки материалов и внедрению ее в промышленность СССР. В течение 1929-1938 гг. Е.О. Патоном был проведён ряд исследований прочности и эксплуатационной надёжности сварных металлических конструкций. Именно в этот период он сформулировал основные положения по технологическим основам дуговой электросварки. В период 1941-1943 гг. Е.О. Патон разрабатывает технологию сварки специальных сталей, исследует физические основы горения электрической дуги под защитным флюсом, изучает свариваемость конструкционных металлов, руководит работами по созданию производства сварных труб, промышленных сосудов и машин различного назначения [17]. В тяжёлые военные годы под его руководством в оборонную промышленность СССР были внедрены оборудование и технология *автоматической электросварки* специальных сталей, брони танков и корпусов авиационных бомб. Он внёс значительный вклад в наращивание выпуска для фронта танков Т-34 в годы Великой отечественной войны (1941-1945 гг.) за счёт внедрения на танковых заводах страны автоматической дуговой электросварки под флюсом [18]. В 1941 году за разработку нового метода и аппаратуры скоростной автоматической электросварки он был удостоен Государственной (Сталинской) премии. Созданные им автоматические сварки позволили снизить трудоёмкость изготовления бронированного корпуса и башни танка Т-34 в восемь раз! [17, 19]. Е.О. Патон является автором и руководителем проектов более 100 сварных мостов в СССР, включая и Украину. Среди них один из крупнейших мостов мира – цельносварной мост через реку Днепр в г. Киеве (рис. 10), получивший в народе название "моста Патона".



Рис. 10. Общий вид Киевского цельносварного моста через реку Днепр ("моста Патона"), построенного в 1953 году [17]

В 1932 году видным ученым в области металлургии и сварки металлов (сплавов), будущим академиком АН УССР (с 1945 года) и член-корреспондентом АН СССР (с 1953 года) Константином Константиновичем Хреновым (рис. 11) впервые в мире была осуществлена дуговая *электросварка под водой* [20]. Этот ученый-сварщик, долго проработавший в ИЭС АН УССР (с 1945-1948 гг. и после 1963 года), в историю мировой сварки вошел как создатель технологии электродуговой подводной сварки и резки металлов.



Рис. 11. Известный украинский ученый в области электросварки и резки металлов под водой, академик АН УССР, лауреат Госпремии СССР К.К. Хренов (1894-1984 гг.) [20]

Эта сварочная технология нашла широкое применение особенно в военный период (1939-1945 гг.) при восстановлении крупных железнодорожных мостов и ремонте речных (морских) судов гражданского и военного назначения. Им были разработаны также специальные источники электропитания для дуговой и контактной сварки металлов, эффективные керамические флюсы, электродные покрытия, новые способы холодной сварки металлов повышенным давлением, их газопрессовая сварка и плазменная резка [20]. Отметим, что керамические флюсы К.К. Хренова (их изготавливали из тонкоизмельченных компонент, замешанных на водном растворе жидкого стекла) обеспечивали дополнительное легирование металла сварочного шва марганцем и кремнием за счет вводимых в состав флюса ферросплавов. Широкое внедрение в СССР в дуговую электросварку этих флюсов позволило производственным в 1950-е годы получать сварочные швы заданного химического состава.

Необходимо отметить, что чем шире в начале 20-го века в промышленность внедрялась дуговая электросварка, тем чаще возникали от нее отрицательные эффекты, настораживающие производителей и эксплуатационников, вызывая с их стороны запреты на применение нового технологического процесса. Трещины в сварных швах и околошовной зоне, повышенные напряжения и деформации целых конструкций, изменяющееся и труднопредсказуемое качество изделия при изменении сварочных материалов, ограниченность свариваемых материалов, их толщин и типов соединений, которые можно выполнять при помощи сварки – вот тот неполный перечень проблемных задач, которые требовали своих научных решений. Но сварочная наука тогда еще не сформировалась, а рекомендации и выводы отдельных ученых не всегда принимались во внимание. В большинстве исследовательских и заводских лабораторий мира изучались преимущественно механические

свойства сварных соединений из низкоуглеродистых сталей, которые характеризовались удовлетворительными значениями предела прочности – от 320 до 400 МПа. Пластические свойства металла шва в сварных соединениях были невысокими (ударная вязкость металла сварных швов при низких и высоких температурах составляла не более 100 кДж/м<sup>2</sup>) [16]. Опытным путем было установлено отрицательное влияние на механические свойства сварных соединений проведения электросварки при отрицательных температурах окружающей среды. В период 1936-1940 гг. в Западной Европе рухнуло несколько крупных сварных мостов. Стало очевидным, что дальнейшее развитие сварки и полная победа новой технологии металлообработки целиком зависят от науки. Поэтому в СССР и за рубежом стали срочно создаваться сварочные научные центры, в которых начались всесторонние исследования по влиянию различных параметров сварочного процесса на состав и свойства металла сварного шва и околошовной зоны, позволяющие найти способы управления качеством сварного соединения. Первой в СССР по времени возникновения сложилась научная школа сварки профессора В.П. Вологодина [16]. Диапазон интересов одного из основоположников отечественной сварочной науки был необычайно широк. В лаборатории сварки Дальневосточного университета В.П. Вологодиным и его учениками были разработаны вопросы, относящиеся к технологии дуговой сварки, деформациям и механическим напряжениям металла при этой сварке. Среди решенных задач учеными этой научной школы сварки можно указать [16]: расчетное определение коэффициентов прочности сварных соединений; оценку влияния при сварке пространственного положения деталей на прочность шва; разработку системы обозначений сварных швов на чертежах; разработку методов расчета сварочных деформаций и напряжений в зоне шва и в околошовной зоне; введение показателей видов сварки плавлением – "коэффициента наплавки" и "коэффициента расплавления".

В военный период 1940-х годов в указанной выше российской лаборатории сварки профессором В.П. Вологодиным были начаты работы по сварке металлов токами высокой частоты (ТВЧ) применительно к стыковой сварке стальных труб (рис. 12) [16]. Использование ТВЧ для сварки подобных труб было основано на проявлении в них одновременно двух электрофизических эффектов – поверхностного и близости [21].

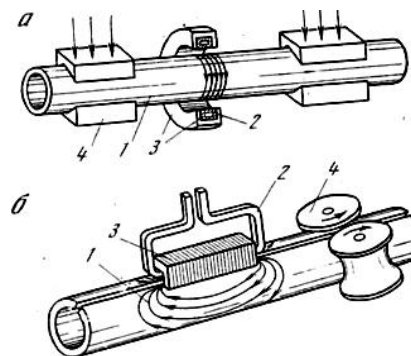


Рис. 12. Схемы поперечной (а) и продольной (б) стыковой сварки труб ТВЧ (1 – свариваемые трубы; 2 – индуктор; 3 – магнетрон; 4 – устройство для создания давления в зоне сварки; стрелками обозначены направления протекания индукционных токов в свариваемых частях труб) [16]

При высокой частоте электрический ток благодаря поверхностному эффекту проходит лишь по тонкому приповерхностному слою обрабатываемого металла. В связи с чем данный эффект приводит к существенному увеличению активного сопротивления обрабатываемых металлоизделий и позволяет сконцентрировать выделение тепловой (джоулевой) энергии в тонких слоях нагреваемых ТВЧ деталей. Эффект близости при этом позволяет управлять распределением практически противоположно направленных возбуждающего и индукционного высокочастотных токов по металлическим поверхностям и локализовать их джоулев нагрев в строго ограниченной зоне. На основе этих работ в СССР были разработаны методы реализации **высокочастотной сварки** (при частотах тока в сотни кГц) при промышленном производстве электросварных стальных труб. К 1965 году в СССР практически все трубосварочные станы для производства стальных труб малого и среднего диаметров были оборудованы электроустройствами для их высокочастотной сварки [16]. Чуть позже были запущены в эксплуатацию советские станы для сварки ТВЧ алюминиевых и латунных труб и экранирующих оболочек силовых кабелей различной номенклатуры. Отметим, что в 1960-е годы аналогичные работы с применением ТВЧ проводились и в ряде зарубежных стран: США, Франции и ФРГ. В этих странах применительно к высокочастотной сварке были разработаны существующие и до настоящего времени два метода подвода переменного тока – контактный и индукционный [16]. При контактном методе ток подводился с помощью электродов (кондукторов), подключающих свариваемые детали к источнику ТВЧ. Этот метод подвода ТВЧ прост и эффективен, но имеет один серьезный недостаток – наличие подвижного электроконтакта между металлической заготовкой и электродами.

В СССР зародился и такой вид промышленной сварки как **стыковая сварка непрерывным оплавлением** (рис. 13), состоящая из двух стадий – оплавления и осадки [3]. На стадии оплавления заготовки из металла устанавливают в зажимах сварочной машины, медленно сближают их между собой и затем включают электрический ток. В результате электрического взрыва металлических перемычек (микронеровностей) на торцах заготовок (труб) возникает тонкий слой расплавленного металла. После достижения глубинного прогрева и устойчивого оплавления торцов заготовок наступает стадия их быстрой осевой осадки за счет резкого сближения свариваемых заготовок. Мгновенную осадку заготовок начинают при включенном токе и завершают при выключенном [3].



Рис. 13. Общий вид российского оборудования для стыковой сварки стальных труб большого диаметра непрерывным оплавлением, находящегося в цеху Псковского завода по производству труб Ø 1420 мм для нефти-и газопроводов) [3]

Стыковая сварка непрерывным оплавлением обеспечивает равномерный прогрев металлозаготовок по сечению. Причем, торцы заготовок перед сваркой не требуют тщательной подготовки. С помощью этого вида сварки можно сваривать заготовки с поперечным сечением сложной формы и большой площадью, а также разнородные металлы. Она позволяет получать стабильное качество свариваемых стыков. Существенным преимуществом подобной сварки является возможность сравнительно легкой автоматизации этого технологического процесса в промышленных условиях. Стыковую сварку оплавлением применяют для соединения металлических заготовок сечением до 0,1 м<sup>2</sup>. Типичными изделиями для нее являются элементы трубчатых конструкций, колеса, рельсы, железобетонная арматура, листы и трубы большого диаметра.

В 1950-е годы советским токарем-изобретателем А.И. Чудиковым была практически реализована идея по сварке металлических деталей трением [3]. Суть этого процесса весьма проста (рис. 14): одна деталь жестко крепится в неподвижный суппорт, который имеет возможность осевого перемещения, а вторая деталь устанавливается в быстро вращающийся патрон установки. При сближении этих деталей в результате трения одного торца о другой происходит износ их торцевых поверхностей и слои металла разных деталей приближаются друг к другу на расстояния, соизмеримые с размером их атомов [3, 16]. В результате образования и разрушения атомных связей в контактной зоне деталей интенсивно выделяется тепловая энергия, которая нагревает в локальной зоне концы заготовок до температурыковки. По достижении необходимых технологических параметров вращающийся патрон резко останавливается, а суппорт продолжает по оси давить на него ещё какое-то время. В результате такого технологического процесса образуется неразъемное соединение. Сварка при этом аналогично кузнечной сковке происходит в твердой фазе.



Рис. 14. Компактное российское оборудование для соосной сварки вращающихся металлических изделий трением [3]

Способ **сварки трением** оказался достаточно экономичным. Автоматизированные установки для сварки трением потребляют электроэнергию в девять раз меньше, чем установки для контактной электросварки. Соединяются детали за считанные секунды и при практическом отсутствии газовых выделений. При подобных условиях получается высокое качество сварки изделий, так как не возникает пористости, включений и раковин в зоне сварки. Данный способ позволяет сваривать разнородные материалы: медь и

алюминий, медь и сталь, алюминий и сталь, в том числе и те, которые невозможно сварить другими способами. При постоянстве технологического режима, обеспечиваемого автоматикой сварочной установки, при данном виде сварки достигается постоянство качества сварного соединения, что позволяет исключить дорогостоящий 100%-ный технический контроль качества сварки деталей. К недостаткам этого способа сварки следует отнести [3]: узкий спектр его применения (свариваются тела вращения в стык); диаметры свариваемых деталей от 4 до 250 мм; невозможность применения в непроизводственных условиях.

При обычной электросварке дуга горит свободно в газовой среде между электродом и обрабатываемым изделием. Учеными-электрофизиками было установлено, что если при помощи каких-либо приемов не дать возможность электрической дуге занять свой естественный объем и сжать ее плазменный канал, то температура дуги значительно повышается. Напомним, что плазмой принято считать частично или полностью ионизированный газ [21]. Низкотемпературная плазма газового электрического разряда в зависимости от состава среды характеризуется температурами от 2000 до 50000 °С [16, 21]. Применение плазмы в сварочной технике началось в СССР с середины 1950-х годов после того как для соединения тонколистового металла получила широкое распространение аргоно-дуговая сварка неплавящимся электродом. Эти работы и положили начало *плазменной сварке* металлов. Основным инструментом при плазменной сварке и резке металлов является плазматрон [16]. В плазматроне рабочий газ подается в разрядную камеру, внутри которой горит мощная электрическая дуга. За счет теплообмена с этой дугой рабочий газ нагревается, ионизируется и истекает через выходное отверстие камеры (сопло) в виде плазменной струи. Именно подобная плазменная струя и используется в качестве источника интенсивного нагрева свариваемого металла. Небезынтересно, что первые сварочные плазматроны были сконструированы на базе горелок для аргоно-дуговой сварки. В сварочных плазматронах истекающая из сопла плазменная струя совмещена со столбом дуги. Поэтому при плазменной сварке и резке теплопередача в обрабатываемый металл осуществляется как путем конвективного нагрева его плазменной струей, так и за счет тепла дуги. Это обеспечивает высокий энергетический КПД данных теплофизических процессов. Применение плазменной сварки и резки в СССР базировалось на результатах исследований, проводимых в Институте металлов им. А.А. Байкова АН СССР под руководством известного ученого-сварщика Николая Николаевича Рыкалина (рис. 15). При плазменной сварке источником теплоты является плазменная струя, получаемая при ионизации рабочего газа в промежутке между электродами. При этом одним из электродов могло быть само свариваемое изделие, либо оба электрода могли находиться в плазменной горелке – плазматроне, кратко описанном нами выше [3]. Струя плазмы в нем сжимается и ускоряется под действием электромагнитных сил, оказывая на свариваемое изделие как тепловое, так и газодинамическое воздействие. Помимо соб-

ственно резки и сварки, этот способ сейчас часто используется для технологических операций наплавки и напыления материалов [16].



Рис. 15. Известный российский ученый в области плазменной сварки и резки материалов, д.т.н., профессор Н.Н. Рыкалин (1903-1985 гг.) [16]

Процесс плазменной резки основан на использовании воздушно-плазменной дуги постоянного тока прямого действия (электрод – катод, а разрезаемый металл – анод). Сущность процесса заключается в местном плавлении и выдувании из зоны резки расплавленного металла с образованием полости разрезки при перемещении резака относительно разрезаемого металла. Н.Н. Рыкалиным в 1950-е годы были изучены физические и энергетические свойства сжатой дуги в аргоне и определены ее технологические возможности. Им, в частности, было показано, что плазменная струя, вышедшая из плазматрона, проявляет для металла ярко выраженные режущие свойства. Это обусловило сравнительно высокие темпы развития промышленных разработок оборудования для плазменной резки и позже сварки металлов. На первой стадии развития плазменной резки в качестве плазмобразующего газа использовали аргон [13, 16]. Его применение обеспечивало высокую стойкость вольфрамовых электродов, легкость зажигания электрической дуги и ее низкое напряжение, что было особенно благоприятно для ручного способа плазменной резки. К середине 1960-х годов в СССР были разработаны ручные и механизированные установки, а также технологии для плазменной резки алюминия, меди, латуни и нержавеющей стали. Последующие работы привели к созданию технологического оборудования, в которых использовались более дешевые рабочие среды, а плазматроны имели более высокую стойкость. Кроме того, были определены области рационального применения рабочих сред при плазменной резке металлов. В качестве рабочих сред плазматронов наиболее широко стали использоваться такие технические газы как азот, водород, кислород и сжатый воздух [16]. Для применения плазменной струи плазматронов при сварке металлов специалистам необходимо было решить сложную техническую задачу – при сохранении высокой тепловой мощности столба дуги предостояло уменьшить ее силовое воздействие, которое выдувало металл из сварочной ванны и вызывало неудовлетворительное формирование сварного шва. Научные исследования, активно проводившиеся в СССР и за рубежом, показали, что для решения вышеуказанной проблемной задачи необходимо было



найти рациональное соотношение для основных технологических характеристик процесса плазменной сварки: величины сварочного тока, длины дуги и расхода плазмообразующего газа в плазмотроне [13, 16]. В результате этих исследований было разработано несколько технологических схем процесса плазменной сварки металлов. Для сварки тонколистовых материалов были применены малоамперные дуги, горящие в импульсном режиме. Импульсное введение тепла в металл расширяло область регулирования теплового режима сварки и существенно уменьшало тепловод в кромки металла. Для расширения диапазона толщин металла, свариваемого сжатой электрической дугой, применили прием, снижающий эффективность обжатия дуги с одновременным увеличением диаметра плазменного канала в сопле плазмотрона. Это позволило сваривать нержавеющей стали и алюминиевые сплавы толщиной до 10 мм. Здесь следует заметить, что исследования специалистов швейцарских фирм "Сешерон" и "Мессер-Грисхайм" по применению для плазменной сварки металлов малоамперных электрических дуг привели к созданию в 1965 году *микроплазменной сварки* [3, 16]. Для микроплазменной сварки используют малогабаритные горелки с вольфрамовым электродом, рассчитанные на сварочный ток не более 40 А. Данным способом сваривают листы толщиной (0,025-0,8) мм из углеродистой и нержавеющей стали, меди, никелевых сплавов, титана, молибдена, тантала, вольфрама и золота. Процесс ведется в непрерывном или импульсном режиме. В настоящее время микроплазменная сварка применяется в самолетостроении, атомной, газовой, электронной, медицинской и других отраслях промышленности для изготовления сильфонов, миниатюрных трубопроводов, полупроводниковых приборов и других изделий. Согласно [13] можно считать, что в течение ближайших десятилетий микроплазменная сварка останется одним из основных способов соединения различных деталей из тонких металлов и сплавов.

Выдающимся украинско-российским изобретателем Н.Н. Бенардосом в конце 19-го столетия была высказана идея *сварки в защитном газе* [3, 13]. Первые сообщения о реализации дуговой электросварке металлов в инертном газе неплавящимся вольфрамовым электродом появились за рубежом в начале 1940-х годов. Соблюдая хронологию мирового развития сварочной индустрии, отметим, что в 1949 году в ИЭС АН УССР был разработан способ электросварки металлов угольным электродом в углекислом газе [16]. Дуговая сварка в защитном газе основана на вытеснении воздуха из зоны сварки потоком газа. В качестве защитного газа при этом используют как инертные газы (аргон и гелий), так и активные газы (азот, водород и углекислый газ), а также смеси этих газов. В 1952 году советские специалисты К.В. Любавский и Н.М. Новожилов получили положительные результаты по электросварке металлов в углекислом газе плавящимся электродом. В этот период в ИЭС АН УССР при непосредственном участии будущего академика АН УССР (с 1958 года) Бориса Евгеньевича Патона (рис. 16) был разработан процесс электродуговой сварки в защитной атмосфере углекислого газа тон-

кой оголенной проволокой диаметром (0,5-1,2) мм [13]. Для реализации этого нового способа металлообработки в СССР была создана специальная аппаратура для автоматической и полуавтоматической дуговой сварки. В настоящее время имеется много разновидностей дуговой электросварки в защитных газах, которые получили широкое распространение как в нашей стране, так и за рубежом. Интенсивное развитие электросварки различных металлов в защитных газах объясняется ее рядом преимуществ по сравнению с дуговой сваркой покрытыми электродами [13, 16]: высокая степень концентрации нагрева изделия, позволяющая значительно уменьшить зону термического влияния и коробление изделия после сварки; возможность получения высококачественных соединений из металлов различных наименований и толщин при различной конфигурации сварных швов и разнообразном расположении их в пространстве; высокая производительность и широкая возможность механизации и автоматизации сварочного процесса.



Рис. 16. Выдающийся украинский ученый и общественный деятель современности, дважды Герой Труда, первый Герой Украины, академик и президент НАН Украины в течение последних 50-ти лет Б.Е. Патон (1918 года рождения) [16]

В 1961 году в СССР была разработана *импульсно-дуговая сварка* металлов [13]. Стабильность процесса и равномерное формирование сварочного шва в тонком металле для этого вида сварки обеспечиваются специально разработанной системой поддержания электрической дуги. Основная особенность данной сварки заключается в том, что в промежутках между импульсами рабочей дуги в зоне сварного шва поддерживается дежурная маломощная дуга. Ток дуги пульсирует от минимума во время паузы до максимума во время прохождения рабочего импульса. При импульсно-дуговой сварке шов получается путем расплавления отдельных точек металла с заданным перекрытием. За счет регулирования соотношения между уровнями токов рабочего импульса и дежурной электрической дуги можно изменять усадочные явления и улучшать качество формирования сварочного шва.

В начале 1950-х годов в ИЭС АН УССР был разработан прогрессивный метод *электрошлаковой сварки* металлов [3, 13]. У истоков этого простого и надежного способа соединения толстостенных деталей стоял выдающийся украинский ученый-сварщик, будущий академик АН СССР (с 1962 года) и РАН (с 1992 года) Б.Е. Патон [16]. Этот вид эффективной сварки металлов является одной из разновидностью их соединения плавлением. Он основан на интенсивном выделении тепла при прохождении электротока через жидкий шлак вблизи

металла. За счет этого тепла расплавляются кромки свариваемых деталей и присадочный металл, а также поддерживается высокая температура образующегося в рабочей зоне расплава. Отметим, что впервые электрошлаковую сварку осуществил в конце 1949 года Г.З. Волошкевич, которому в 1956 году было выдано авторское свидетельство СССР на изобретение данного способа соединения металлов [16]. На международной выставке в г. Брюсселе в 1958 году этот вид сварки был отмечен большой золотой медалью "Гран-при" и получил неофициальное название "Русская сварка". Наибольшее применение этот способ сварки металлов получил при изготовлении изделий из аустенитных, жаропрочных и других марок стали, титана, алюминидовых сплавов и меди при высоте свариваемого стыка до 100 см [13, 16]. Он широко используется сейчас в мире при изготовлении мощных гидротурбин, прессов, химических реакторов и других уникальных изделий.

**Электронно-лучевая сварка** материалов основана на использовании тепла, которое выделяется при торможении острогофокусированного потока свободных электронов, ускоренных до высоких энергий [16]. Явление термического воздействия электронных пучков на твердые материалы было известно давно. Однако только благодаря развитию вакуумной техники и электронной оптики этот источник нагрева материала получил широкое применение сначала в сварочной, а затем и в металлургической технике. Изначальным толчком в 1960-е годы к поиску подобного нового вида сварки послужили возникшие трудности при соединении таких широко используемых в атомной и ракетно-космической технике трудносвариваемых металлов как молибден, тантал, ниобий, вольфрам и цирконий, обладающих высокой температурой плавления и химической активностью. Неразъемное соединение указанных металлов требовало высококонцентрированных источников тепла и серьезной защиты рабочей зоны сварки. В конце 1950-х годов в СССР в Московском энергетическом институте под руководством профессора Н.А. Ольшевского и в ИЭС им. Е.О. Патона АН УССР под руководством известного украинского ученого Б.А. Мовчана независимо от поисковых работ иностранных специалистов (французских и американских инженеров Д.А. Стора, Д. Бриолы, В.Л. Вимена) были проведены отечественные исследования по применению новой технологии электронно-лучевой сварки металлов [3, 13]. При создании сварочных электронных "пушек" были решены многие сложные физико-технические вопросы, которые не возникали ранее в электронном приборостроении. Для сварки металлов потребовались пучки электронов с малыми поперечными сечениями на значительном расстоянии от "пушки" и в условиях их рассеяния на остаточных газах и парах свариваемых металлов. В процессе электронно-лучевой сварки в вакууме порядка  $10^{-4}$  мм рт.ст. обеспечивается практически полное отсутствие примеси вредных газов. Высокая концентрация тепловой мощности и плотности теплового потока в электронном пучке (до  $110 \text{ Вт/см}^2$ ) при минимальной площади пятна нагрева (до  $10^{-7} \text{ см}^2$ ) способствуют уменьшению термических деформаций металла при его сварке, незначительным структурным превращениям в зоне нагрева и обеспечивают формирование сварочного шва с ярко выраженной "кинжальной"

формой проплавления металла [16]. Комплексное изучение в ИЭС АН УССР под руководством его директора (с 1953 года), преемника академика УССР Е.О. Патона, академика АН УССР, лауреата Сталинской (1950 год) и Ленинской (1957 год) премий Б.Е. Патона физических основ электротермических процессов, протекающих при электронно-лучевой сварке, позволило определить рациональные области ее применения в промышленности и создать современное сварочное электрооборудование.

### 3. СОВРЕМЕННАЯ КЛАССИФИКАЦИЯ ОСНОВНЫХ ВИДОВ СВАРКИ МАТЕРИАЛОВ

Классификация сварки металлов по основным физическим, техническим и технологическим признакам устанавливается требованиями действующего ГОСТ 19521-74 [3]. Что касается физических признаков, то они в зависимости от формы энергии, используемой для образования сварного соединения, подразделяются на три класса [3]: 1) **термический класс** (виды сварки, осуществляемые плавлением с использованием тепловой энергии); 2) **термомеханический класс** (виды сварки, осуществляемые с использованием тепловой энергии и давления); 3) **механический класс** (виды сварки, осуществляемые с использованием механической энергии и давления). К техническим признакам относятся [3]: а) способы защиты металла в зоне сварки; б) непрерывность процесса сварки; в) степень механизации сварки. Технологические признаки устанавливаются по ГОСТ 19521-74 для каждого способа сварки отдельно. Для **термического класса** характерны такие виды сварки материалов [3,16]:

- **Электродуговая сварка.** Источником теплоты здесь является электрическая дуга, возникающая между торцом металлического электрода и свариваемым изделием при протекании сварочного тока в результате замыкания внешней цепи электросварочного аппарата. Для ясности укажем, что сварочной дугой называется длительный мощный электрический разряд в ионизированной среде. Начальная фаза этой среды может быть любой: твердой (например, сварочный флюс); жидкой (например, вода); газообразной (например, аргон); плазменной. При этом выделяющееся тепло нагревает торец электрода и оплавляет свариваемые поверхности, что приводит к образованию сварочной ванны – малого объема жидкого металла. В процессе остывания и кристаллизации сварочной ванны и образуется неразъемное сварное соединение. Основными разновидностями электродуговой сварки являются: ручная дуговая сварка (рис. 17); сварка неплавящимся электродом; сварка плавящимся электродом; сварка под флюсом; сварка в защитном газе.



Рис. 17. Электродуговая ручная сварка покрытым электродом, ставшая широко распространенным видом сварки [22]

• **Газопламенная сварка.** Источником теплоты в этом случае является мощный газовый факел, образующийся при сгорании смеси кислорода и горючего газа (рис. 18). В качестве горючего газа могут быть использованы: ацетилен, МАФ, пропан, бутан, блаугаз, водород, керосин, бензин, бензол и их смеси [3].



Рис. 18. Газовая сварка при помощи факела, образуемого сгоранием ацетилена в среде кислорода (фото 1942 года) [3]

Тепло, выделяющееся при сгорании горючего газа в смеси кислорода, при этом виде сварки металла расплавляет свариваемые поверхности и присадочный материал с образованием сварочной ванны. Пламя может быть окислительным, "нейтральным" или восстановительным (науглероживающим). Все это регулируется соотношением кислорода и горючего газа.

• **Электрошлаковая сварка.** Источником теплоты при этом служит шлак, находящийся между свариваемыми изделиями и разогревающийся проходящим через него электрическим током. Этот вид сварки нашел своё практическое применение особенно при выполнении больших вертикальных сварочных швов для толстостенных металлических изделий [16].

• **Плазменная сварка.** Источником теплоты является сжимаемая и ускоряемая плазменная струя, получаемая при ионизации рабочего газа в промежутке между металлическими электродами плазмотрона.

• **Электронно-лучевая сварка.** Источником теплоты здесь является электронный луч, получаемый за счёт термоэлектронной эмиссии с катода электронной "пушки" [3]. Сварка металла ведётся в вакуумных камерах при низком давлении порядка ( $10^{-3} - 10^{-4}$ ) Па. Фокусировкой электронного луча можно получать пятно нагрева диаметром от 0,2 мкм до 5 мм, что позволяет за один технологический проход сваривать тугоплавкие металлы толщиной от 0,1 до 200 мм.

• **Лазерная сварка.** Источником теплоты служит лазерный луч, генерируемый оптическим квантовым генератором – лазером [3, 24]. Лазерная сварка производится на воздухе или в среде защитных газов – аргона или углекислого газа. При диаметре луча в 0,1 мм и менее в процессе лазерной сварки объём сварочной ванны оказывается небольшим. Это обеспечивает малую ширину зоны термического влияния, высокую скорость нагрева и охлаждения металла. Характеризуется высокой прочностью сварных соединений и небольшой деформацией сварных конструкций.

• **Стыковая сварка пластмасс оплавлением.** Источником теплоты служит плоский нагревательный элемент [3]. Эта сварка делится на несколько этапов: нагрев под давлением и прогрев массы, вывод нагревательного элемента, сварка и затвердевание массы. Применяется для сварки полиэтиленовых труб [16].

• **Термитная сварка.** Источником теплоты являются химические реакции восстановления оксидов металлов (обычно железа) алюминием или магнием [13]. Применяется при получении сварных соединений для металлических деталей большого сечения [3].

Для *термомеханического класса* характерны следующие виды сварки материалов [3, 16]:

• **Контактная сварка.** Источником теплоты является электрический ток, проходящий через контактное соединение электрода и свариваемого изделия. При контактной сварке происходят два последовательных процесса: вначале нагрев частей свариваемого изделия до пластического состояния и затем совместное пластическое деформирование этих частей. Основными разновидностями этого вида сварки являются: точечная контактная сварка, стыковая сварка, рельефная сварка, диффузионная сварка и шовная (кузнечная) сварка [3]. Отметим, что такой редкий способ соединения изделий как диффузионная сварка материалов осуществляется путем взаимного проникновения атомов свариваемых частей изделия при их повышенной температуре (около 800 °С). Методом диффузной сварки пользуются при создании соединений из разнородных металлов, отличающихся по своим физико-химическим свойствам, и изготовлении изделий из многослойных композиционных материалов. Этот способ сварки был разработан в 1950-х годах российским изобретателем Н.Ф. Казаковым [16].

• **Сварка высокочастотными токами.** Источником теплоты при данной сварке служит высокочастотный электрический ток, проходящий между свариваемыми частями металлического изделия [3]. При последующем пластическом деформировании частей изделия и остывании образуется сварное соединение.

• **Сварка трением.** История этого простого вида сварки металла в твердой фазе берет свое начало с 1950-х годов, когда российскому изобретателю А.И. Чудикову на обычном токарном станке впервые удалось прочно соединить два стержня из низкоуглеродистой стали (один вращающийся в патроне и другой неподвижно закрепленный в суппорте станка) [3].

Для *механического класса* характерными являются следующие виды сварки металлов [3, 16]:

• **Сварка взрывом.** Этот вид сварки осуществляется сближением атомов свариваемых частей металлического изделия на расстояние действия межатомных сил за счёт энергии, выделяемой при взрыве над свариваемым изделием химического взрывчатого вещества [3, 23]. Разработан и практически реализован данный вид сварки металлов был украинскими учеными и изобретателями из ИЭС АН УССР им. Е.О. Патона совместно с российскими учеными из СО АН СССР, руководимыми академиком АН СССР М.А. Лаврентьевым [23]. С помощью данного способа сварки в настоящее время получают биметаллы и уникальные многослойные металлические композиции для объектов ракетно-космической техники [23, 24].

• **Ультразвуковая сварка металлов.** Эта сварка осуществляется сближением атомов свариваемых частей металлического изделия на расстояние действия межатомных сил за счёт энергии ультразвуковых колебаний, вводимых в материалы свариваемых частей

[3]. Ультразвуковая сварка, несмотря на высокую стоимость ее оборудования, нашла применение в производстве микросхем, прецизионных изделий, сварке разнородных металлов и металлов с неметаллами [3].

• **Холодная сварка.** Холодная сварка представляет собою соединение однородных или неоднородных металлов при температуре ниже минимальной температуры рекристаллизации [3]. Данная сварка происходит благодаря пластической деформации свариваемых металлов в зоне их стыка под воздействием больших механических усилий. Она может быть стыковой, точечной и шовной. Прочность соединения существенно зависит от усилия сжатия и степени деформации свариваемых металлических деталей [16].

#### 4. УПРОЩЕННЫЕ ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ СВАРКИ МЕТАЛЛОВ

При сварке материалов могут использоваться различные внешние мощные источники энергии: электрическая дуга, газовое пламя, высокочастотные токи, трение, ультразвук, механическое сжатие, плазменная струя, электронный луч и лазерное излучение. Указанные источники энергии при сварке материалов предназначаются для создания физических условий, обеспечивающих установление межатомных (межмолекулярных) связей между соединяемыми частями свариваемого технического изделия или биологического объекта. Более подробно возможный механизм установления таких связей на микроскопических расстояниях в соединяемых материалах рассмотрим на примере электродуговой сварки металлов (рис. 19).



Рис. 19. Внешний вид ослепительно яркой рабочей зоны при электродуговой сварке металлов, сопровождающейся радиальным разбрызгиванием мелких капель металла [3]

К электроду и свариваемому изделию для образования и поддержания электрической дуги от сварочного трансформатора подводится электроэнергия. Под действием теплоты электрической дуги, имеющей температуру до 5000 °С [3], кромки свариваемых деталей и электродный металл расплавляются, образуя сварочную ванну, которая некоторое время находится в расплавленном состоянии. В сварочной ванне жидкий металл электрода на атомарном уровне смешивается с расплавленным металлом изделия (основным металлом), а расплавленный шлак всплывает на поверхность ванны, образуя защитную плёнку. При затвердевании и кристаллизации металла образуется сварное соединение. Энергия, необходимая для образования и поддержания при этом электрической дуги,

подаётся от специального источника питания постоянного или переменного тока. В процессе дуговой электросварки могут быть использованы как плавящиеся, так и неплавящиеся электроды. В первом случае формирование сварочного шва происходит при расплавлении самого электрода, а во втором случае – при расплавлении присадочной проволоки или прутков, которые вводят непосредственно в сварочную ванну. Сварка плавящимся электродом является самым распространённым способом сварки. В этом случае дуга горит между основным металлом и металлическим стержнем, подаваемым в зону сварки по мере плавления. При дуговой электросварке плавящимся электродом последний может выполняться оголенным (без защиты зоны сварки от окружающего воздуха), с тонким стабилизирующим покрытием и с толстым защитным покрытием [3]. Стабилизирующие покрытия на сварочных электродах содержат материалы с химическими элементами, легко ионизирующими сварочную дугу. Они наносятся тонким слоем на металлические стержни электродов (тонкопокрытые электроды), предназначенных для ручной дуговой сварки. Толстые защитные покрытия на электродах (толстопокрываемые электроды) представляют собой механическую смесь различных материалов, предназначенных для ограждения (защиты) расплавленного металла от воздействия воздуха, стабилизации горения дуги, легирования и рафинирования (очистки) металла сварочного шва. Для повышенной защиты от окисления металла сварочного шва применяются защитные газы (аргон, гелий, углекислый газ и их смеси), подающиеся из сварочной головки в процессе электросварки. Для электродуговой сварки используются как постоянный, так и переменный ток. При электродуговой сварке постоянным током сварочный шов получается с меньшим количеством брызг металла, поскольку нет перехода рабочего тока через нуль и смены его полярности (направления протекания электрических зарядов в дуге). Электрическую дугу, питаемую постоянным током, различают прямой (минус на электроде) и обратной (плюс на электроде) полярности. При электродуговой сварке металлов плавлением КПД создания дуги достигает от 70 до 90 % [3].

#### 5. СОВРЕМЕННЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ В СВАРКЕ МАТЕРИАЛОВ

В настоящее время сварка применяется для взаимного соединения большинства металлов и их сплавов и термопластов во всех областях производства, а также используется в медицине при соединении биологических тканей человека. Открытие в 19-ом столетии и промышленное освоение в 20-ом веке электродугового нагрева металлов, высокотемпературного газо-кислородного горения и плазмотронов с мощными ионными струями наряду с возросшими техническими требованиями к качеству сварного соединения совершили технологический прорыв в области сварки материалов, в результате которого создались многие технологии бесконтактной сварки. Остановимся вкратце на ряде современных достижений в области сварки материалов, относящихся к концу 20-го века и началу 21-го столетия. К ним можно отнести [3, 16]:

• **Лазерную сварку металлов.** При высокой концентрации световых квантов (порций) энергии на малой поверхности материала можно получать большие значения ее температуры. На этом физическом принципе и основана сварка материалов световым лучом оптического квантового генератора – лазера, впервые созданного в США во второй половине 20-го века [23, 25]. Основными энергетическими характеристиками процесса лазерной сварки являются плотность мощности  $E_L$  лазерного излучения и длительность  $t_L$  его действия. При непрерывном световом излучении величина  $t_L$  определяется продолжительностью времени экспонирования, а при импульсном – длительностью светового импульса. На практике лазерную сварку металла ведут при плотностях мощности  $E_L$  излучения лазера, численно составляющих от  $10^6$  до  $10^7$  Вт/см<sup>2</sup> [25]. При  $E_L < 10^5$  Вт/см<sup>2</sup> лазерное излучение теряет свое основное достоинство – высокую концентрацию тепловой энергии. При  $E_L > 10^7$  Вт/см<sup>2</sup> лазерный луч вызывает интенсивное объемное кипение и испарение (сублимацию) металла, приводящее к выбросам металла из зоны сварки и дефектам сварочного шва [25]. Варьирование значений  $E_L$  и  $t_L$  позволяет сваривать лазерным лучом различные конструкционные материалы с толщиной от нескольких микрометров до десятков миллиметров. На рис. 20 приведен общий вид современной установки для лазерной сварки металлических дверей автомобиля [3].

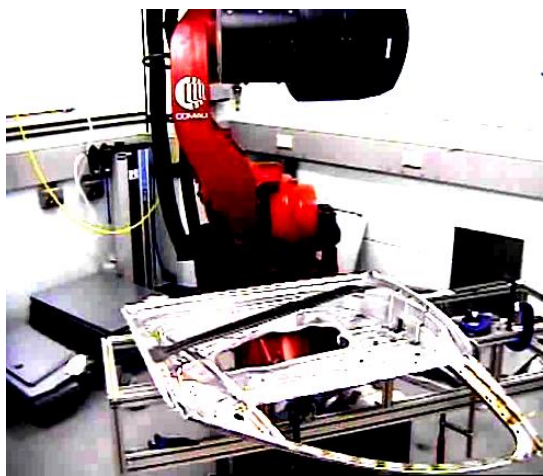


Рис. 20. Российская установка для лазерной сварки стальной металлоконструкции дверей легкового автомобиля [3]

Отметим, что первые установки в СССР для лазерной сварки металлов (типа УЛ-2 и УЛ-20) появились в 1963 году на твердотельном рубиновом лазере с максимальной энергией излучения соответственно 2 и 20 Дж [25]. Эти лазерные установки предназначались для сварки металлов толщиной от 0,1 до 1 мм. В современных технологических лазерах применяются как твердотельные, так и газовые излучатели. В твердотельных лазерах в качестве рабочего тела сейчас используются активные элементы из рубина, стекла с присадками ионов неодима и алюмоиттриевого граната с неодимом. В настоящее время лазерная сварка широко применяется для создания металлоконструкций из сталей различных марок, алюминиевых, маг-

ниевых и титановых сплавов. Ей отдается предпочтение при необходимости получения прецизионных конструкций из металла, форма и размеры которых не должны практически изменяться в результате сварки.

• **Сварку в космосе.** Советские эксперименты по сварке в космосе открыли новую страницу в освоении нашей Вселенной. В СССР головной организацией по созданию универсальной переносной установки для выполнения сварочных работ в условиях открытого космоса в конце 1960-х годов был определен ИЭС АН УССР, а научным руководителем всего комплекса данных исследований стал академик АН СССР Б.Е. Патон [13, 26]. После многочисленных исследований в барокамере (рис. 21) и летающей лаборатории на базе самолета Ту-104 в СССР был разработан универсальный ручной инструмент для сварки металлов в космосе. Специалисты остановились на компактном, ранцевом варианте космического сварочного инструмента с автономным источником питания, который мог бы позволить космонавту проводить работы в космосе, связанные с ремонтом или монтажом, на любом участке наружной поверхности космического аппарата.

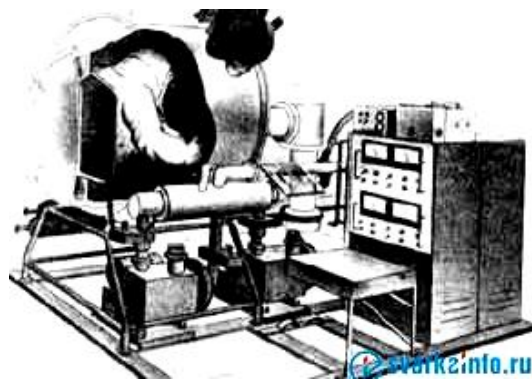


Рис. 21. Фрагмент стенда-тренажера для исследования ручной сварки в условиях, имитирующих космические [13]

В соответствии с программой космических исследований СССР первый в мире эксперимент по сварке в открытом космосе был выполнен 16 октября 1969 года на советском космическом корабле "Союз-6" летчиками-космонавтами Г.С. Шонинным и В.Н. Кубасовым [3, 16]. Ими были выполнены сварка и резка тонколистовой нержавеющей стали и титанового сплава электронным лучом, сжатой дугой низкого давления и плавящимся электродом. Кроме того, было показано, что процессы плавления, сварки и резки электронным лучом на орбите протекают стабильно, обеспечивая необходимые условия для нормального формирования сварных соединений и поверхностей резов. Укажем, что в последнее время дальнейшее развитие получила **плазменная сварка**, где электрическая дуга между неплавящимися электродами плазматрона используется для высокотемпературного нагрева промежуточного носителя тепла (например, водяного пара) [3, 16]. Проводятся работы по **дуговой электросварке** атомарным водородом, получаемым в дуге между неплавящимися вольфрамовыми электродами, и выделяющим тепло при рекомбинации (соединении) в молекулы на свариваемых деталях [3, 16].

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 16: Открытия и изобретения в металлургии // Электротехника і електромеханіка. – 2013. – № 5. – С. 3-13.
2. <http://www.weldguru.com/welding-history.html>.
3. <http://ru.wikipedia.org/wiki/Сварка>.
4. <http://www.keytometals.com/page.aspx>.
5. Шнейберг Я.А. Василий Владимирович Петров (1761-1834). – М.: Наука, 1985. – 224 с.
6. Намитоков К.К., Клименко Б.В. Электрическая дуга: 200-летний юбилей великого открытия // Электротехника і електромеханіка. – 2003. – № 2. – С. 46-49.
7. Баранов М.И. Избранные вопросы электрофизики: Монография в 2-х томах. Том 1: Электрофизика и выдающиеся физики мира. – Харьков: Изд-во НТУ "ХПИ", 2008. – 252 с.
8. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Петров\\_Василий\\_Владимирович](http://ru.wikipedia.org/wiki/Петров_Василий_Владимирович).
9. Выдающиеся физики мира. Рекомендательный указатель / Научн. ред. Б.Г. Кузнецов. – М.: Типография Б-ки им. В.И. Ленина, 1958. – 436 с.
10. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Бенардос\\_Николай\\_Николаевич](http://ru.wikipedia.org/wiki/Бенардос_Николай_Николаевич).
11. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Славянов\\_Николай\\_Гаврилович](http://ru.wikipedia.org/wiki/Славянов_Николай_Гаврилович).
12. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Миткевич\\_Владимир\\_Фёдорович](http://ru.wikipedia.org/wiki/Миткевич_Владимир_Фёдорович).
13. <http://www.svarkainfo.ru/rus/lib/history>.
14. Фролов В.А., Пешков В.В., Коломенский А.Б., Казаков В.А. Сварка. Введение в специальность. – М.: Высшая школа, 2004. – 320 с.
15. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике. Часть 15: Изобретение транспорта // Электротехника і електромеханіка. – 2013. – № 4. – С. 3-15.
16. Шалимов М.П., Панов В.И. Сварка вчера, сегодня, завтра. – Екатеринбург: Изд-во "УПИ", 2006. – 296 с.
17. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Патон\\_Евгений\\_Оскарлович](http://ru.wikipedia.org/wiki/Патон_Евгений_Оскарлович).
18. Васильева Л.Н., Желтов И., Чикова Г.Ф. Правда о танке Т-34. – М.: "Атлантида – XXI век", 2005. – 480 с.
19. Патон Е.О. Скоростная автоматическая сварка под слоем флюса. – М.: Изд-во "Машгиз", 1941. – 112 с.
20. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Хренов\\_Константин\\_Константинович](http://ru.wikipedia.org/wiki/Хренов_Константин_Константинович).
21. Кузьмичев В.Е. Законы и формулы физики / Отв. ред. В.К. Тартаковский. – Киев: Наукова думка, 1989. – 864 с.
22. [http://ru.wikipedia.org/wiki/Дуговая\\_сварка](http://ru.wikipedia.org/wiki/Дуговая_сварка).
23. Баранов М.И. Антология выдающихся достижений в науке и технике: Монография в 2-х томах. Том 1. – Харьков: Изд-во "НТМТ", 2011. – 311 с.
24. Резниченко В.И., Пахомов С.Н., Мостипан С.Е. Экспериментально-промышленный комплекс сварки взрывом государственного предприятия "Конструкторское бюро "Южное" им. М.К. Янгеля" // Авиационно-космическая техника и технология. – 2007. – №11 (47). – С. 102-108.
25. <http://www.migatronic.ru/content/view/43/46/>
26. Патон Б.Е., Лапчинский В.Ф. Сварка и родственные технологии в космосе. – Киев: Наукова думка, 1998. – 184 с.

**Bibliography (transliterated):** 1. Baranov M.I. Antologija vydajushhihsja dostizhenij v nauke i tehnike. Chast' 16: Otkrytija i izobretenija v metallurgii // Elektrotehnika i elektromehanika. – 2013. – № 5. – S. 3-13. 2. [www.weldguru.com/welding-history.html](http://www.weldguru.com/welding-history.html). 3. [ru.wikipedia.org/wiki/Сварка](http://ru.wikipedia.org/wiki/Сварка). 4. [www.keytometals.com/page.aspx](http://www.keytometals.com/page.aspx). 5. Shneiberg Ja.A. Vasilij Vladimirovich Petrov (1761-1834). – M.: Nauka, 1985. – 224 p. 6. Namitokov K.K., Klimenko B.V. Jelektricheskaja duga: 200-letnij jubilej velikogo otkrytija // Elektrotehnika i elektromehanika. – 2003. – № 2. – P. 46-49. 7. Baranov M.I. Izbrannye voprosy jelektrofiziki: Monografija v 2-h tomah. Tom 1: Jelektrofizika i vydajushhihsja fiziki mira. – Har'kov: Izd-vo NTU "HPI", 2008. – 252 p. 8. [ru.wikipedia.org/wiki/Petrov\\_Vasilij\\_Vladimirovich](http://ru.wikipedia.org/wiki/Petrov_Vasilij_Vladimirovich). 9. Vydajushhihsja fiziki mira. Rekomendatel'nyj ukazatel' / Nauchn. red. B.G. Kuznecov. – M.: Tipografija B-ki im. V.I. Lenina, 1958. – 436 p. 10. [ru.wikipedia.org/wiki/Benardos\\_Nikolaj\\_Nikolaevich](http://ru.wikipedia.org/wiki/Benardos_Nikolaj_Nikolaevich). 11. [ru.wikipedia.org/wiki/Slavjanov\\_Nikolaj\\_Gavrilovich](http://ru.wikipedia.org/wiki/Slavjanov_Nikolaj_Gavrilovich). 12. [ru.wikipedia.org/wiki/Mitkevich\\_Vladimir\\_Fedorovich](http://ru.wikipedia.org/wiki/Mitkevich_Vladimir_Fedorovich). 13. [www.svarkainfo.ru/rus/lib/history](http://www.svarkainfo.ru/rus/lib/history). 14. Frolov V.A., Peshkov V.V., Kolomenskij A.B., Kazakov V.A. Svarka. Vvedenie v special'nost'. – M.: Vysshaja shkola, 2004. – 320 p. 15. Baranov M.I. Antologija vydajushhihsja dostizhenij v nauke i tehnike. Chast' 15: Izobretenie transporta // Elektrotehnika i elektromehanika. – 2013. – № 4. – P. 3-15. 16. Shalimov M.P., Panov V.I. Svarka vchera, segodnja, zavtra. – Ekaterinburg: Izd-vo "UPI", 2006. – 296 p. 17. [ru.wikipedia.org/wiki/Paton\\_Evgenij\\_Oskarovich](http://ru.wikipedia.org/wiki/Paton_Evgenij_Oskarovich). 18. Vasil'eva L.N., Zheltov I., Chikova G.F. Pravda o tanke T-34. – M.: "Atlantida – XXI vek", 2005. – 480 p. 19. Paton E.O. Skorostnaja avtomaticheskaja svarka pod sloem fljusa. – M.: Izd-vo "Mashgiz", 1941. – 112 p. 20. [ru.wikipedia.org/wiki/Hrenov\\_Konstantin\\_Konstantinovich](http://ru.wikipedia.org/wiki/Hrenov_Konstantin_Konstantinovich). 21. Kuz'michev V.E. Zakony i formuly fiziki / Otv. red. V.K. Tartakovskij. – Kiev: Naukova dumka, 1989. – 864 p. 22. [ru.wikipedia.org/wiki/Dugovaja\\_svarka](http://ru.wikipedia.org/wiki/Dugovaja_svarka). 23. Baranov M.I. Antologija vydajushhihsja dostizhenij v nauke i tehnike: Monografija v 2-h tomah. Tom 1. – Har'kov: Izd-vo "NTMT", 2011. – 311 p. 24. Reznichenko V.I., Pahomov S.N., Mostipan S.E. Jeksperimental'no-promyshlennyj kompleks svarki vzryvom gosudarstvennogo predprijatija "Konstruktorskoe bjuro "Juzhnoe" im. M.K. Jangelja" // Aviacionno-kosmicheskaja tehnika i tehnologija. – 2007. – №11 (47). – P. 102-108. 25. [www.migatronic.ru/content/view/43/46/](http://www.migatronic.ru/content/view/43/46/). 26. Paton B.E., Lapchinskij V.F. Svarka i rodstvennyje tehnologii v kosmose. – Kiev: Naukova dumka, 1998. – 184 p.

*Поступила (received) 29.06.2012*

*Баранов Михаил Иванович, д.т.н., с.н.с.  
НИПКИ "Молния" НТУ "ХПИ",  
61013, Харьков, ул. Шевченко, 47,  
тел/phone: +38 057 7076841, e-mail: eft@kpi.kharkov.ua*

*Baranov M.I.*

*Scientific-&-Research Planning-&-Design Institute "Molniya"  
National Technical University "Kharkiv Polytechnic Institute"  
47, Shevchenko Str., Kharkiv, 61013, Ukraine*

**An anthology of outstanding achievements in science and technology. Part 17: Inventions in material welding.**

*A brief scientific essay on the history of invention of the main welding technologies for metals and other materials is presented. Key words – history, invention, welding of materials.*