

УДК 621.791.001.12/.8

СОВРЕМЕННЫЕ ДОСТИЖЕНИЯ ИЭС им. Е. О. ПАТОНА В ОБЛАСТИ СВАРКИ И РОДСТВЕННЫХ ПРОЦЕССОВ

Академик Б. Е. Патон

Представлены разработки ИЭС им. Е. О. Патона в области сварки и родственных процессов, выполненные в последние годы. Приведены данные о новых технологических процессах, путях совершенствования технологий и материалов, повышении ресурса эксплуатации сварных конструкций.

Developments of the E.O.Paton Electro Welding Institute in the field of welding and related processes, made over the recent years, have been presented. They include information about the new technological processes, way of updating the technologies and materials and increase in service life of welded structures.

Ключевые слова: парофазные технологии; электронно-лучевая сварка и переплав; выращивание монокристаллов; контактная стыковая сварка; дуговые и гибридные процессы; электрошлаковые технологии, сварка живых тканей; математическое моделирование; сварка взрывом; сварочные материалы; защитные покрытия; неразрушающий контроль; техническая диагностика; сварные конструкции; ресурс эксплуатации

В сентябре 2004 г. Институт электросварки отметил 70-летний юбилей. Традиции, заложенные основателем института Е. О. Патоном, базируются на сочетании целенаправленных фундаментальных теоретических исследований с инженерно-прикладными разработками, тесными творческими связями с промышленными предприятиями, что отличает их от таковых многих других научно-исследовательских организаций. Институт является крупнейшим научно-исследовательским центром в области сварки и родственных технологий. В настоящее время совершенствуются его структура и система управления с целью дальнейшего развития сварки и родственных процессов, а также решения базовых проблем промышленного производства в новых условиях.

В предыдущие годы многократно освещались различные направления деятельности института и его достижения в научно-техническом прогрессе общества. В данной статье представлены некоторые последние научные и прикладные разработки института.

Новые технологические процессы

Парофазные технологии. Активно развивается новое направление получения неорганических материалов с аморфной, нано- и микроразмерной структурой способами высокоскоростного электронно-лучевого испарения веществ и осаждения паровой фазы в вакууме (ЕВ-РВД). Новые металлические, металлокерамические и керамические материалы по этой технологии производят в виде функциональных или конструкционных покрытий на поверхности различных изделий, а также фольг, пластин (листа) или некоторых конструктивных элементов с широким диапазоном толщин (от 1...2 мкм до 5...10 мм).

Особого внимания заслуживает технология электронно-лучевого испарения композиционных слитков, в которых «запрограммированы» состав и структура градиентных материалов, осаждаемых из паро-

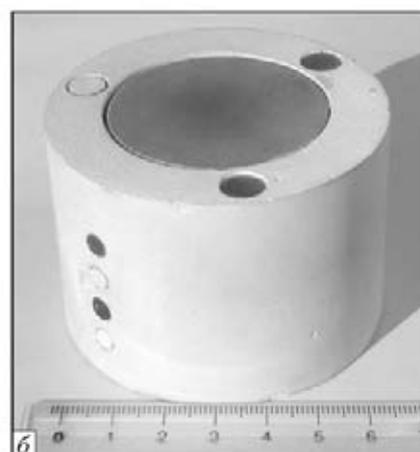
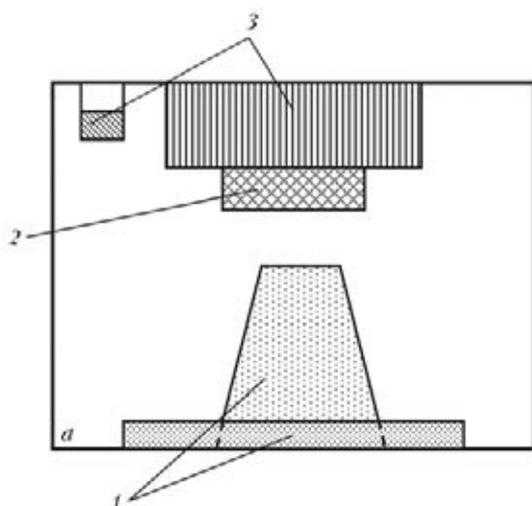


Рис. 1. Схема строения (а) и общий вид композиционного слитка (б): 1 — керамика или смесь керамик; 2 — смесь металлов; 3 — металл, сплав, керамика или органические добавки

© Б. Е. ПАТОН, 2005

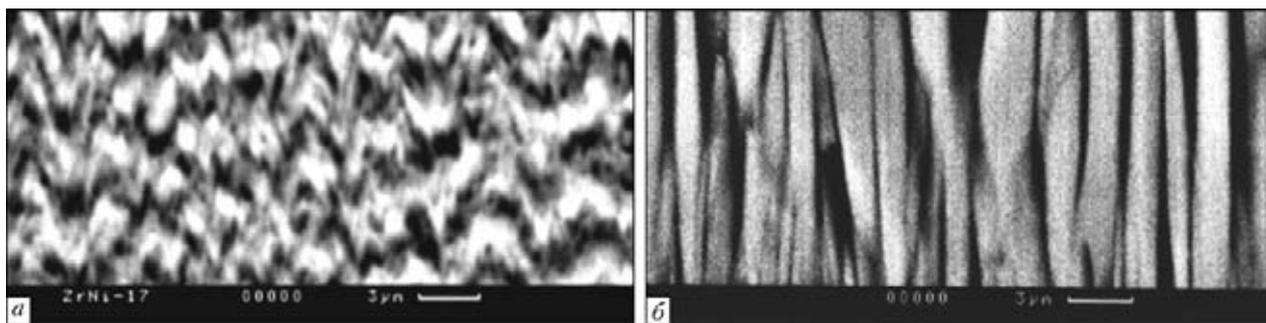


Рис. 2. Структура пористого покрытия ZrO_2 (7 % Y_2O_3) с добавкой Ni (а) и NaCl (б)

вой фазы. На рис. 1 приведены схема строения и общий вид композиционного слитка, состоящего из керамической основы и отдельных фрагментов (вставок) металлических и неметаллических материалов. Вставки веществ требуемых формы, размеров и упругости пара при температуре испарения располагаются в объеме слитка таким образом, чтобы при его непрерывном испарении и последующей конденсации паровой фазы на подложке формировался материал с заданными градиентами состава и структуры.

Необходимо отметить также гибридные технологические процессы, включающие ионизацию парового потока основного компонента и/или введение в него из рядом расположенного источника или с помощью композиционного слитка неорганических или органических добавок, взаимодействующих на поверхности конденсации с основным компонентом. В отдельных вариантах это могут быть химические реакции, сопровождающиеся удалением продуктов реакции с поверхности конденсации. Такая «обработка» парового потока позволяет в широком диапазоне регулировать структуру конденсатов (рис. 2).

В качестве примеров существующих и разрабатываемых направлений практического применения парофазных технологий и новых материалов служат защитные и конструкционные покрытия на лопатках газовых турбин различного назначения; твердооксидные топливные ячейки; особо твердые покрытия на инструменте для обработки материалов; катализаторы в виде градиентных пористых покрытий на соответствующих поверхностях (проволоке, ленте, сетке и др.); биоматериалы и биопокрывтия; материалы и покрытия с особыми физическими свойствами (оптическими, электрическими, магнитными и др.).

Полученные к настоящему времени экспериментальные результаты высокоскоростного электрон-

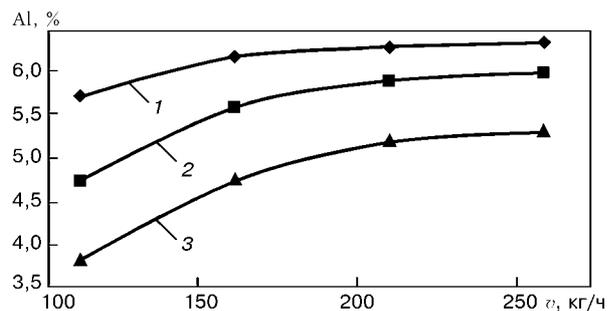


Рис. 3. Зависимость степени испарения алюминия от скорости плавки $v_{пл}$ при мощности электронно-лучевого обогрева металла в кристаллизаторе 90 (1); 120 (2); 160 (3)

но-лучевого испарения углерода и углеродсодержащих веществ свидетельствуют о возможности применения этой технологии для получения нанотрубок и алмазоподобных структур.

Электронно-лучевая плавка с промежуточным тиглем. Развиваются работы в направлении совершенствования технологии электронно-лучевого перепада для производства титановых слитков и полуфабрикатов с использованием более дешевого исходного сырья — титановой губки. В настоящее время НПЦ «Титан», входящий в состав института, может выпускать промышленные партии титановых слитков до 1500 т в год. Из последних достижений следует отметить разработку технологии плавки слитков-слябов сплава ВТ6 с мелкозернистой равноосной структурой.

С помощью моделирования процесса испарения легирующих элементов определена зависимость степени испарения алюминия от скорости плавки и мощности электронно-лучевого обогрева металла в кристаллизаторе. Определено, что при мощности электронно-лучевого обогрева металла менее 120 кВт и скорости плавки более 200 кг/ч содержание алюминия в слитке соответствует требованиям стандарта для сплава ВТ6 (рис. 3).

Построена трехмерная математическая модель переноса тепла во время формирования слитков-слябов. На основе температурного поля сделаны расчеты градиентов температур, скоростей охлаждения и скоростей кристаллизации расплава в каждой точке слитка-сляба титанового сплава ВТ6. Доказана адекватность модели и возможность прогнозирования структуры слитков.

Определен оптимальный технологический режим (мощность электронно-лучевого обогрева металла 90 кВт и скорость плавки 200 кг/ч), позволяющий получать мелкозернистую равноосную структуру по всему поперечному разрезу сляба, что подтверждается анализом макроструктуры слитков-слябов титанового сплава ВТ6 сечением 150×950 мм длиной 2 м (рис. 4).

В ИЭС им. Е. О. Патона способом электронно-лучевой плавки получены слитки-слябы из титанового сплава ПТ-3В с гомогенным химическим составом и структурой, из которых на ОАО «Фео-



Рис. 4. Макроструктура слитка-сляба сплава ВТ6 сечением 150×950 мм

досийская судостроительная компания «Море» изготовили сварные конструкции крыльевых устройств для морских судов толщиной 200...250 мм без разделки сварочных кромок. Использование слитков-слябов позволило увеличить выход годного металла на 10 % и снизить себестоимость на 20 %, по сравнению с традиционной технологией.

Кроме того, в области электронно-лучевой плавки с промежуточной емкостью учеными института впервые в мире созданы технологии и оборудование для выплавки слитков из недробленых блоков губчатого титана; получения высококачественных слитков сложнолегированных титановых сплавов; выплавки полых слитков для производства крупногабаритных титановых труб, а технологию оплавления боковой поверхности слитков успешно применяют вместо их механической обработки.*

Электронно-лучевая сварка материалов большой толщины. Впервые проведены теоретические и экспериментальные исследования спектра собственных колебаний расплавленного металла в парогазовых каналах большой глубины. Установлено, что возникающие под воздействием реакции отдачи испаряющегося металла возмущения в виде капиллярных волн на внутренней поверхности канала имеют дискретный спектр колебаний, первая гармоника которых, характеризующаяся наименьшей частотой и наибольшей амплитудой, оказывает определяющее влияние на стабильность геометрических размеров парогазового канала и образование дефектов в виде различных несплошностей в средней и корневой частях сварных швов. На основании этого установлено, что стабильность парогазовых каналов большой глубины может быть повышена путем наклона плоскости стыка и электронного пучка на угол 10...12° к горизонту. При такой пространственной переориентации сварочной ванны в поле силы тяжести происходит изменение характера собственных колебаний расплава, т. е. превращение их из чисто капиллярных волн, характерных для вертикального канала, в капиллярно-гравитационные. Подобная трансформация колебаний расплава в наклонном парогазовом канале приводит существенному увеличению частот наиболее низких гармоник колебаний, что способствует уменьшению амплитуды возмущений поверхности расплава на передней стенке канала и, как следствие, — повышению стабильности сварочного процесса в целом.

Кроме того, эффективным средством повышения устойчивости формирования глубоких швов оказалось применение развертки с параллельным переносом луча вдоль и поперек направления сварки. Это приводит к снижению усредненной концентрации мощности, выделяемой на стенках парогазового канала, а также к уменьшению количества первичных электронов, достигающих дна канала, что благоприятно сказывается на повышении стабильности парогазового канала в целом. Для этого случая определен оптимальный диапазон частот развертки электронного луча большой мощности

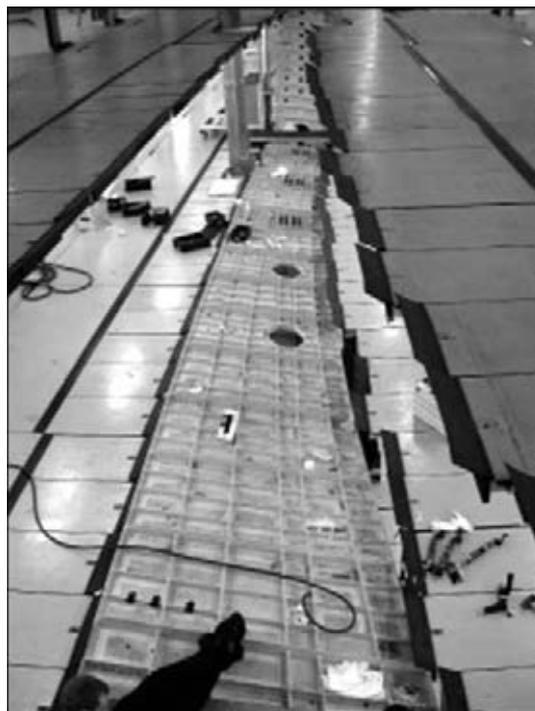


Рис. 5. Сборка крыла самолета А-380 в «AIRBUS UK» с применением сваренных электронным лучом крупногабаритных панелей (фото предоставлено фирмой «AIRBUS»)

при электронно-лучевой сварке металлов и сплавов большой толщины.

Результаты исследований легли в основу технологических процессов электронно-лучевой сварки самолетных конструкций (рис. 5), изготавливаемых из высокопрочных алюминиевых сплавов толщиной до 150 мм.

Выращивание монокристаллов. Монокристаллы тугоплавких металлов (вольфрам, молибден) являются продукцией «высоких» технологий. Большинство программ в космической атомной энергетике и аэрокосмической технике зависят от прорывов в науке и технике высокотемпературных материалов. Проблема выращивания крупных монокристаллов тугоплавких металлов в течение ряда лет казалась неразрешимой из-за их высокой температуры плавления. Разработанный в институте способ плазменно-индукционного зонного выращивания монокристаллов позволил решить эту проблему. Уникальность способа заключается в том, что для него практически не существует каких-либо ограничений как по размерам, так и по профилю поперечного сечения (круг, квадрат, пластина, труба и т. п.).

Сочетание плазменного и индукционного нагрева (рис. 6) позволяет удерживать ванну жидкого металла в электромагнитном поле без контакта с охлаждаемой медью. Это предопределило перспективы данного способа в выращивании крупных и сверхкрупных (20 × 140 × 170 мм и более) монокристаллов тугоплавких металлов, поскольку увеличение их размеров имеет решающее влияние на расширение масштабов их применения в технике. Ориентированные монокристаллы из вольфрама и мо-

*Цикл научных работ «Разработка физико-металлургических и технологических основ изготовления и обработки титана и сплавов на его основе и их внедрение в промышленность Украины» (Н. П. Тригуб, В. Н. Замков, С. В. Ахонин, В. В. Тэлин, А. Н. Петрунько, О. М. Ивасишин, С. А. Фирстов, О. А. Жуков, В. А. Трофимов, С. Н. Антонов) выдвинут на соискание Государственной премии Украины в области науки и техники за 2005 г. (Примеч. ред.)

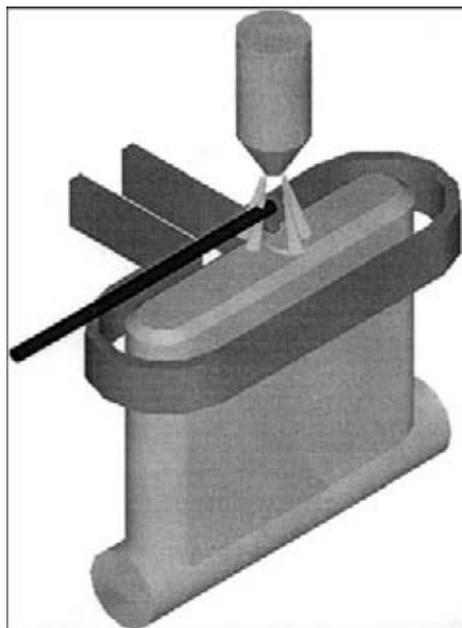


Рис. 6. Схема процесса плазменно-индукционного выращивания сверхкрупных монокристаллов тугоплавких металлов

либдена, особенно профилированные, могут быть идеальной заготовкой для широкоформатного проката из тугоплавких металлов.

Электрошлаковые процессы в производстве композитных заготовок. Среди промышленных способов получения композитных, в том числе многослойных и биметаллических заготовок и изделий, особое место занимают способы, основанные на применении электрошлакового процесса: электрошлаковая наплавка (ЭШН), электрошлаковая сварка (ЭШС), электрошлаковый переплав (ЭШП), выгодно отличающиеся от других универсальностью и эффективностью.

В последние годы благодаря разработке в ИЭС им. Е. О. Патона нового технологического процесса электрошлаковой наплавки жидким металлом (ЭШН ЖМ) и новой технологической схемы ЭШП с двумя источниками питания и использованием токоподводящего кристаллизатора открылись новые возможности для совершенствования технологии получения биметаллических заготовок и изделий различного назначения, таких как композитные заготовки прокатных валков, биметаллическая арма-



Рис. 7. Внешний вид промышленного агрегата ЭШН ЖМ на ЗАО «НКМЗ» и заготовки композитного прокатного валка Ø 740 мм, наплавленного способом ЭШН ЖМ

тура, подовые сталемедные электроды дуговых печей и др.

Одним из важнейших условий получения качественной композитной заготовки является минимальное изменение химического состава металла наплавленного слоя за счет разбавления его металлом наплавленной заготовки. Исследования изотропности химического состава по высоте и сечению композитных заготовок валков ЭШН ЖМ (образцы вырезали из нижней, средней и верхней частей заготовки) показали практически равномерное распределение основных легирующих элементов как по высоте, так и по сечению наплавленного слоя. Аналогичные результаты получены по замерам твердости на наплавленных заготовках, что свидетельствует об изотропности свойств рабочего слоя композитных заготовок валков, полученных ЭШН ЖМ.

Изучение технологических возможностей ЭШН ЖМ показало, что этот способ имеет целый ряд преимуществ по сравнению с традиционными. Применение ЭШН ЖМ позволяет наплачивать наружные поверхности цилиндрических заготовок практически любого диаметра, толщина наплавленного слоя определяется исключительно требованиями пользователя и может составлять 20...100 мм и более. ЭШН ЖМ характеризуется высокой производительностью процесса, в десятки раз превосходящую производительность традиционных способов (в зависимости от размеров наплаваемых деталей и применяемых материалов составляет 200...800 кг/ч и более).

В рамках совместных работ с ЗАО «НКМЗ» создан первый в мире промышленный агрегат для ЭШН ЖМ (рис. 7), предназначенный для производства композитных заготовок прокатных валков диаметром до 1000 мм, длиной наплаваемой бочки до 2500 мм и массой до 20 т, накоплен значительный опыт по изготовлению заготовок с высокохромистым наплавленным слоем, прежде всего для рабочих валков непрерывных широкополосных станов. Испытания таких валков показали, что их стойкость в 2...3 раза выше по сравнению со стандартными чугунами валками, использовавшимися ранее.

Благодаря разработанной технологии ЭШН ЖМ и особой конструкции применяемого токоподводящего кристаллизатора в процессе наплавки биметаллической заготовки осуществляется постоянное регламентированное вращение шлакометаллического расплава. Это позволяет максимально усреднить температуру и химический состав металлической ванны в поперечном сечении, способствует более равномерному проплавлению основного слоя и получению заданной равномерной толщины наплавленного слоя. Технология ЭШН ЖМ реализована при изготовлении биметаллических заготовок диаметром 350 мм с коррозионно-стойкой наплавкой из аустенитной стали типа 316L и основным слоем из стали 20ГС для биметаллического арматурного профиля 16 мм (рис. 8). Металлографическими исследованиями установлено отсутствие каких-либо дефектов (отслоений, трещин, шлаковых включений и др.) по линии сплавления разнородных сталей.

В качестве подовых электродов современных дуговых печей постоянного тока используют композитные биметаллические заготовки (сталь + медь).

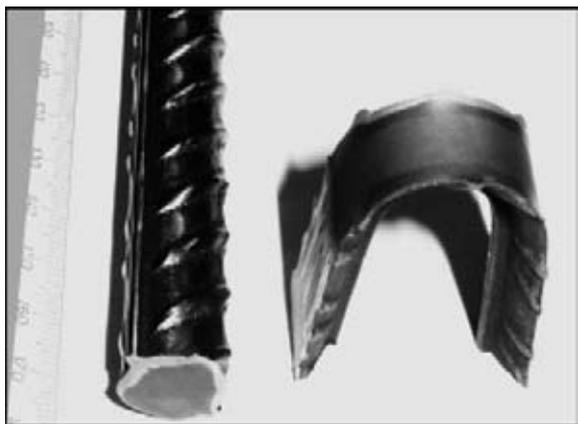


Рис. 8. Внешний вид загнутого образца (продольного макрошлифа) биметаллического арматурного профиля $\varnothing 16$ мм

В процессе эксплуатации печи стальная часть электрода контактирует с жидким расплавом, а его медная часть является нижним токоподводом и к ней подключают измерительные приборы. От качества разнородного соединения (сталь + медь) во многом зависит надежность подового электрода и эффективность эксплуатации дуговой печи.

В ИЭС им. Е. О. Патона разработана новая технологическая схема получения биметаллических сталемедных слитков для подовых электродов дуговых печей постоянного тока, основанная на применении электрошлакового процесса в токоподводящем кристаллизаторе по двухконтурной схеме (ЭШП ДС), которая позволяет в широких пределах изменять не только глубину, но и форму металлической ванны. При этом решаются основные проблемы, связанные с обеспечением минимальной протяженности переходной зоны разнородных металлов и получением высококачественного биметалла с гарантированной прочностью соединения слоев. Созданная на основе ЭШП ДС технология обеспечивает получение моноблочных биметаллических слитков (сталь + медь) для подовых электродов диаметром до 350 мм и длиной до 1300 мм (рис. 9). Проведенный комплекс исследований металла биметаллических слитков, в том числе макро- и микроисследования (рис. 10) зоны соединения разнородных металлов (сталь + медь), подтвердил их высокое металлургическое качество и

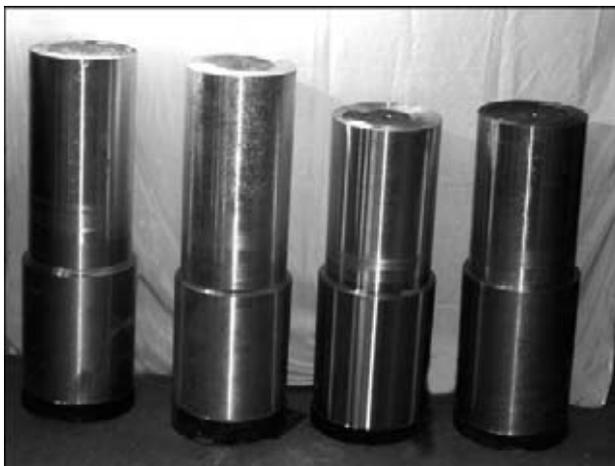


Рис. 9. Промышленная партия сталемедных биметаллических слитков ЭШП ДС $\varnothing 350$ мм для подовых электродов дуговой печи

соответствие требованиям, предъявляемым к подовым электродам дуговых печей постоянного тока.

Контактная стыковая сварка. Контактная сварка оплавлением является наиболее эффективным способом соединения металлов. Это направление успешно развивается, его возможности далеко не исчерпаны. Разработана разновидность способа сварки непрерывным оплавлением, получившая название сварки пульсирующим оплавлением. Этот способ, запатентованный в ведущих странах мира, позволяет почти вдвое снизить длительность процесса сварки и припуски на оплавление (рис. 11), обеспечить высококонцентрированный нагрев. Это открывает новые возможности для соединения трудносвариваемых, разупрочняющихся материалов, а также для расширения областей применения контактной стыковой сварки. На его основе разработаны новые технологии сварки высокопрочных сталей и сплавов разнородных материалов, в частности технология сварки рельсов бесконечной длины при ремонте бесстыковых железнодорожных путей. Необходимый припуск на сварку в данном случае реализуется за счет растяжения свариваемых рельсов. Разработаны компьютеризированные системы автоматического управления основными параметрами, обеспечивающие воспроизводство заданных режимов сварки независимо от усилий натяжения в рельсах. Кроме того, система управления позволяет устанавливать заданный уровень напряжений в рельсовых плетях бесстыкового пути с учетом температуры окружающей среды при сварке. Разработано новое поколение рельсосварочных машин типа К922 для сварки с натяжением, в которых реализованы новые технологии и системы управления. Производство таких машин, пользующихся спросом на мировом рынке, организовано на Каховском заводе электросварочного оборудования.

На основе способа пульсирующего оплавления разработаны новые технологии соединения заготовок проката с большой площадью поперечного сечения (более 20000 мм²). Для реализации этих технологий изготовлена новая контактная стыковая машина К1003 (рис. 12).

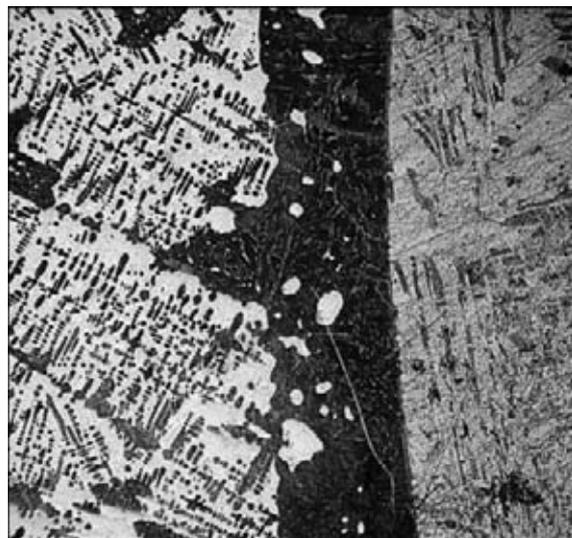


Рис. 10. Микроструктура ($\times 320$) зоны соединения разнородных металлов (сталь + медь) в биметаллических слитках ЭШП ДС $\varnothing 350$ мм для подовых электродов дуговой печи

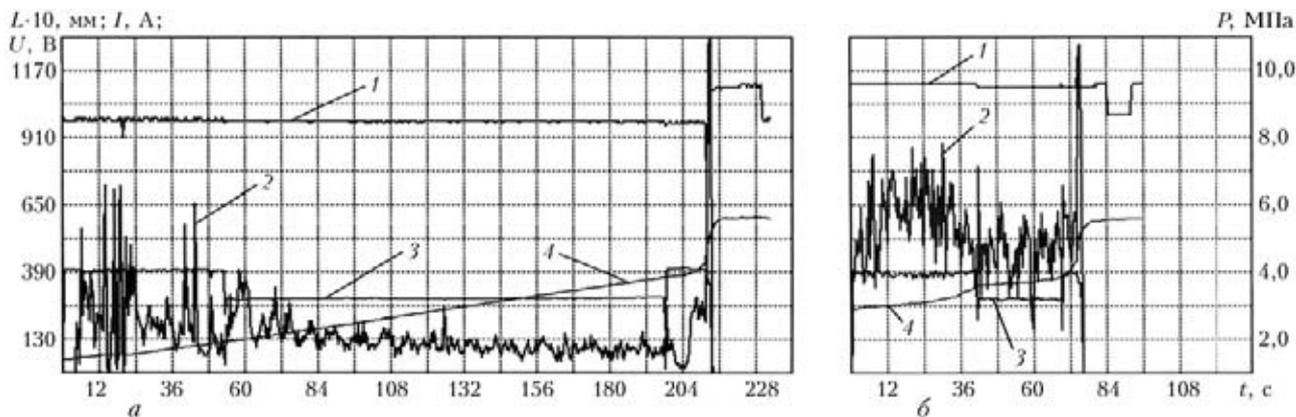


Рис. 11. Основные параметры контактной дуговой сварки рельсов Р 65 с непрерывным (а) и пульсирующим оплавлением (б): 1 — давление; 2 — сварочный ток; 3 — сварочное напряжение; 4 — перемещение

Созданы принципиально новые процессы пресовой сварки с нагревом дугой, управляемой магнитным полем, существенно расширившие технологические возможности способа, в частности сварка труб диаметром до 219 мм с толщиной стенки до 12 мм (традиционный процесс позволяет соединять трубы диаметром до 100 мм при толщине стенки не более 6 мм). Создана гамма универсального и специализированного оборудования для реализации этого технологического процесса.

Гибридные процессы. В последние годы в институте сформировалось новое направление в создании наукоемких технологий — гибридные способы сварки. Исследуются процессы, основанные на использовании лазерного излучения и дуги с плавящимся электродом, а также лазерного излучения и плазмы (рис. 13). Разработаны технологии лазерно-дуговой сварки сталей и алюминиевых сплавов, а также комбинированной и гибридной наплавки и поверхностного легирования сталей. Предложена технология многопроходной гибридной сварки (лазер + дуга с плавящимся электродом) сталей больших толщин (рис. 13, а). При ограниченной мощности лазерного излучения (до 3 кВт) этот способ позволяет сваривать за три-четыре прохода низколегированную сталь толщиной до 20 мм (при однопроходной лазерной сварке сталей такой толщины необходима мощность лазерного излучения до 10 кВт). Установлено, что скорость гибридной сварки алюминиевых сплавов может достигать

300 м/ч (для $\delta = 2$ мм) и более (рис. 13, б). При тех же мощностных параметрах дуги и лазерного пучка скорость дуговой сварки составляет 30...50 м/ч, а лазерной — 60 м/ч. Повышение скорости обусловлено синергетическим эффектом (взаимным влиянием и повышением стабильности составляющих гибридного процесса).

Для нанесения особо тонких слоев износо- и коррозионно-стойких покрытий разработан комбинированный процесс, заключающийся в объединении микроплазменного напыления и лазерной наплавки. Он позволяет устранить основной недостаток лазерной наплавки — трещинообразование, а также повысить плотность напыленных покрытий и прочность их сцепления с основой (рис. 14, а). При этом отпадает необходимость в предварительной подготовке поверхности, необходимой в случае применения микроплазменного напыления. Подобный комбинированный процесс предложено использовать для поверхностного легирования сталей с целью повыше-

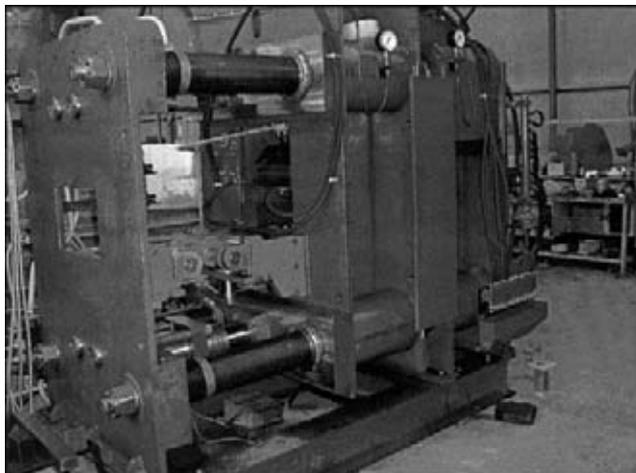


Рис. 12. Контактная машина К 1003 для соединения заготовок проката большого сечения

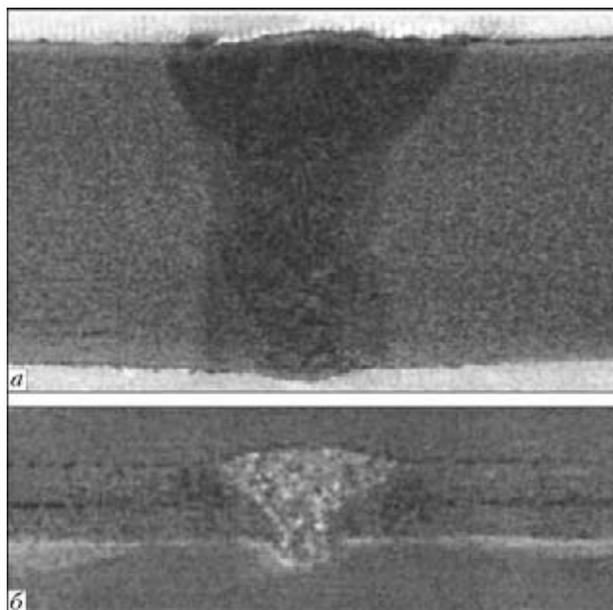


Рис. 13. Макроструктура стыковых соединений, выполненных лазерно-дуговой сваркой: а — сталь Х70 толщиной 18,7 мм, четыре прохода (мощность излучения 2,7 кВт; скорость сварки 25 м/ч; скорость подачи проволоки 400 м/ч, \varnothing 1,2 мм; ток сварки 200 А; напряжение 25 В; защита — CO_2), $\times 2,5$; б — сплав АМг6 толщиной 1,9 мм (мощность излучения 2,5 кВт; скорость сварки 300 м/ч; скорость подачи проволоки 760 м/ч; ток сварки 200 А; защита — Ar), $\times 5$

ния их твердости и жаростойкости (рис. 14, б). Получение твердых дорожек легирования в более мягкой и пластичной матрице позволяет снизить склонность к образованию сетки разгарных трещин при эксплуатации, например, артиллерийских стволов.

Сварка мягких тканей животных и человека. Это совершенно новое для института направление. Издавна известно применение токов высокой частоты для гемостаза — закрытия сосудов с целью прекращения или предупреждения кровотечений при выполнении хирургических операций. Нами показана еще одна область применения тока высокой частоты — для соединения разрезов участков тканей и органов без ниток и металлических скобок, сокращения времени пребывания больного под наркозом, сведения к минимуму попадания в рану продуктов распада, минимизации потерь крови, снижения бактерицидного действия и более во время операции, снижения вероятности метастазирования и потери крови. Техника получения соединений напоминает технологию сварки сопротивлением металлических деталей, отчасти полимерных материалов. Механизм образования соединения существенно отличается. Нагрев ткани протекающим по ней током высокой частоты приводит к денатурации белков, ускорению их теплового движения и возникновению общего белкового пространства, при остывании которого образуется соединение. Остывание сопровождается ренатурацией белков, т. е. восстановлением строения. Однако белковая структура восстанавливается не полностью. Часть молекул претерпевает необратимые изменения и не ренатурирует. Степень ренатурации зависит от наибольшей температуры и времени пребывания ткани при ней. Поскольку необратимое изменение белков нежелательно, сварка должна производиться в сравнительно узких температурных и временных интервалах, что требует автоматического управления с соответствующими обратными связями.

Созданы образцы электрохирургического оборудования (рис. 15), которые, кроме сварки, можно использовать и для гемостаза, а также термической резки тканей. Оборудование применяется в нескольких украинских клиниках не только для выполнения экспериментальных операций, но и в обычной практической работе. Использование сварки оказалось эффективным в общей хирургии, оперативной гинекологии, онкологии, оториноларингологии, операциях на печени, легких и других органах.

Мы намерены и далее развивать работы в области электрохирургии как одним из важнейших направлений современной медицины.

Совершенствование технологий и материалов

Математическое моделирование. Большое внимание при исследовании и оптимизации сварочных технологий уделяется математическому моделированию характерных физических (химических) процессов (явлений), от которых в

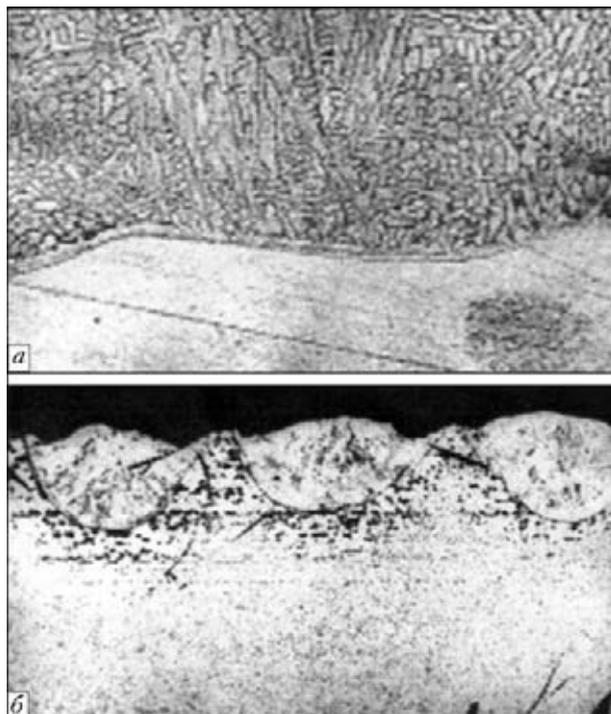


Рис. 14. Микроструктура покрытия из сплава системы Ni-Cr-B-Si, нанесенного на углеродистую сталь, $\times 1000$ (а) и дорожек лазерно-микроплазменного поверхностного легирования низкоуглеродистой стали хромом, $\times 32$ (б)

значительной степени зависит качество изделия. Развитие компьютерной техники создает хорошие перспективы для применения достаточно сложных моделей, отражающих многофакторность и взаимосвязь явлений, протекающих при сварке и родственных процессах, что весьма важно для углубления познаний в этой области. Кроме того, компьютеризация математического моделирования делает его доступным для широкого круга пользователей, занимающихся не только исследованием, но и разработкой, а также оптимизацией инженерных решений.

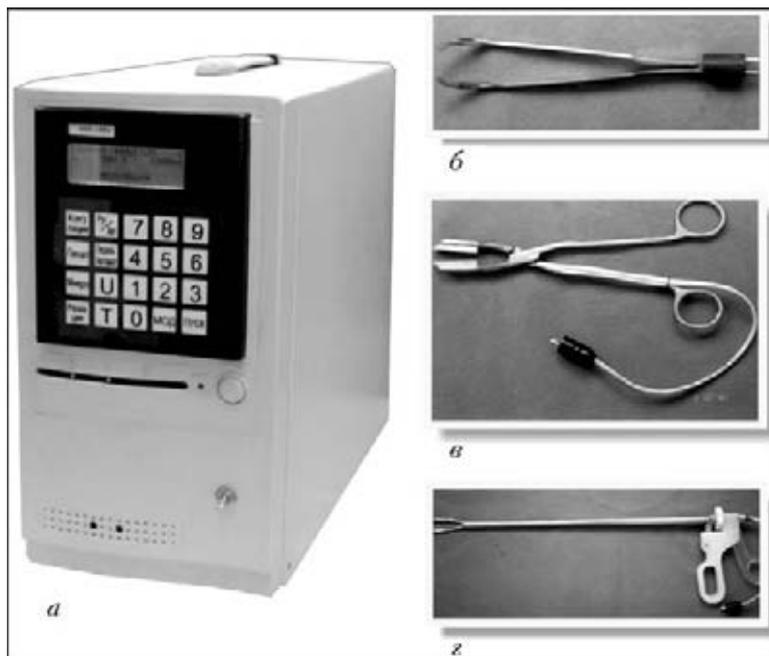


Рис. 15. Медицинские оборудование и инструменты для сварки живых тканей: а — высокочастотный сварочный источник питания; б — сварочный пинцет; в — сварочный зажим; г — лапароскопический зажим

К приоритетным направлениям относится разработка информационно-расчетных систем для характерных типовых задач, представляющих интерес для практики, в частности системы для выбора рационального способа дуговой сварки, сварочных материалов и режимов применительно к сварке конкретной конструкционной стали; определения напряженно-деформированного состояния при сварке кольцевых многопроходных швов одно- и разнородных толстостенных элементов конструкций; определения напряжений и деформаций трубной решетки теплообменников при вварке трубок; прогнозирования напряжений и деформаций, микроструктуры и свойств при наплавке тел вращения типа валов по винтовой линии малого шага с учетом сложных термических циклов в металле ЗТВ и наплавленном слое; создания для стыковой контактной сварки оплавлением (сопротивлением) системы по моделированию связанных полей электрического потенциала, тепловыделений, температур, деформаций и напряжений на основе измеряемых во времени параметров процесса (напряжения силы тока, силы сжатия, перемещения осадки).

Сварка конструкций из высокопрочных низколегированных сталей. Работы последних лет посвящены решению проблем сварки конструкций из высокопрочных низколегированных сталей, прежде всего предупреждению хрупкого разрушения сварных соединений, связанного со структурными превращениями и охрупчивающим действием водорода.

Предложен новый физически обоснованный критерий, характеризующий степень снижения хрупкой прочности металла под влиянием водорода, разработана методика применения нового критерия, учитывающего данные механических испытаний.

Главным звеном водородного охрупчивания является поведение зародышевой микротрещины, возникающей в процессе деформации, в присутствии водорода.

Локализация отрицательного заряда на адсорбированных атомах водорода приводит к снижению уровня нормального напряжения, необходимого для перехода микротрещины к автокаталитическому распространению в поле напряжений, что на макроуровне воспринимается как эффект охрупчивания.

Наиболее важными факторами водородной хрупкости являются эволюция дислокационной структуры при пластической деформации, а также свойства границ зерен, частиц второй фазы, неметаллических включений. Особая роль дислокаций в механизме водородной хрупкости обусловлена тем, что их перемещение является основным механизмом пластической деформации и одновременно наиболее эффективным способом транспортирования водорода в объеме металла.

Неметаллические включения в зависимости от их связи с матрицей могут действовать с самого начала деформирования как трещины, а хрупкие включения могут сами инициировать зарождение острых трещин.

Водород в металле шва и ЗТВ снижает удельную энергию поверхности субмикротрещины.

Снижение напряжения хрупкого разрушения, инициируемого субмикротрещиной, возникающей

по дислокационной схеме, пропорционально уменьшению удельной поверхностной энергии металла под влиянием водорода.

Понизить восприимчивость сварного соединения к холодному растрескиванию можно путем введения в металл шва ловушек водорода, которыми являются различные структурные дефекты (вакансии, растворенные атомы, дислокации, границы зерен и фаз, микро- и макropоры, неметаллические включения, частицы второй фазы и т.п.). Эффективно введение в металл шва редкоземельных элементов. Соединения этих элементов сорбируют водород, освобождая от него матрицу металла и тормозят массоперенос водорода в наиболее напряженных участках шва и ЗТВ.

Проведены исследования механизма абсорбции водорода металлом в процессе сварки, оценена роль температуры дуги, полярности тока, температуры расплавленного металла, воздушной среды и аппаратуры для определения водорода в сварочных материалах и сварных соединениях.

Абсорбция водорода из плазмы дугового разряда определяется степенью ее ионизации и зависит от температуры дуги.

Оценка поведения гидроксидов и фтористого водорода в атмосфере дуги показала, что фтор и кислород эффективно взаимодействуют с водородом на периферии столба дуги.

Определены основные источники водорода в сварочных материалах, предложены металлургические и технологические меры, позволяющие снижать содержание водорода в металле сварных соединений и предупреждать образование индуцированных водородом трещин.

Результаты исследований использованы для разработок сварочных материалов — электродов и агломерированных флюсов, обеспечивающих получение ультранизких содержаний водорода в металле швов (до $1 \text{ см}^3/100 \text{ г}$). Это позволяет значительно снизить температуру подогрева изделий.

Создан ряд марок порошковых проволок для сварки толстостенных конструкций металлургического оборудования.

Применение новых низководородных сварочных материалов весьма перспективно в судостроении, при изготовлении тяжелонагруженных машиностроительных металлоконструкций, при строительстве трубопроводов и во многих других отраслях.

Разработана серия электродов для сварки низколегированных сталей повышенной и высокой прочности:

АНО-101, АНО-102 (для сталей с пределом текучести до 460 МПа, с системой легирования Si-Mn, Si-Mn-Ni-Cu);

АНО-100 (для сталей с пределом текучести до 550 МПа, с системой легирования Si-Mn-Cr-Ni-Cu);

АНО-103 (для сталей с пределом текучести до 650 МПа, с системой легирования Si-Mn-Mo).

Созданы следующие новые агломерированные флюсы для сварки низколегированных сталей:

АНК-561 (флюс алюминатно-основного типа для сварки сталей с пределом текучести до 490 МПа, с системой легирования Mn-Si-Ni);

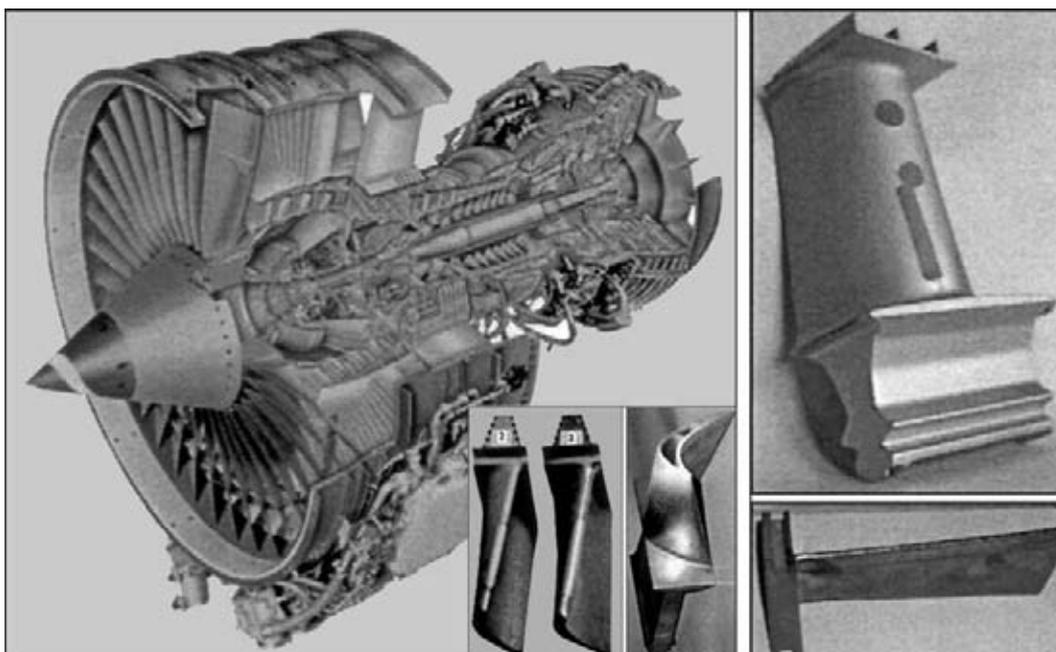


Рис. 16. Рабочие и сопловые лопатки из никелевых суперсплавов

АНК-57 (флюс флюоритно-основного типа для сварки сталей с пределом текучести до 590 МПа, с системой легирования Mn–Si–Ni–Mo–Ti).

Электрошлаковая сварка. Созданы аппараты нового поколения для ЭШС проволочными электродами: АД381 (двухэлектродный монтажный аппарат для сварки толщин 30... 60 мм) и АШ 115М (для сварки криволинейных стыков толщиной металла до 200 мм).

Аппарат АД381 успешно применен при ремонте и сооружении корпусов кожухов доменных печей и корпусов конвертеров из низколегированных сталей. Аппарат позволил выполнить все вертикальные укрупнения и монтажные стыки, что значительно повысило производительность монтажа.

Проведены работы по увеличению в два и более раз скорости ЭШС с одновременным снижением тепловложения с целью увеличения производительности и отказа от послесварочной термообработки. Основной принцип — управление зоной выделения тепла и электрогидродинамикой шлаковой и металлической ванны. Управление реализуется за счет варьирования траектории протекания тока в шлаковой ванне путем соответствующего подключения и коммутации токоподводов к электродам и свариваемому изделию.

Осуществляются исследования по разработке способа электрошлаковой сварки или наплавки неподвижными плавящимися секционными электродами большого сечения в узком зазоре для толстого металла, который позволяет получать сварные швы большой толщины без применения сложной сварочной аппаратуры и дефицитной сварочной проволоки. Процесс может управляться по заданной программе. В настоящее время достигнута толщина соединения в 600 мм.

Разработаны и успешно применяются системы стабилизации тока, напряжения и контроля уровня металлической ванны.

Сварка высоколегированных сталей и сплавов. Авиационные двигатели, а также газотурбинные ус-

тановки (ГТУ) наземного или морского применения являются очень важной и наиболее наукоемкой частью современной транспортной техники. Совершенствование их технических характеристик (эффективной мощности, стоимости, влияния на экологию, эксплуатационного ресурса и др.) представляет собой сложные конструкторскую, материаловедческую и технологическую задачи. Во всем мире интенсивно работают над их решением. Необходимы ключевые технологии, открывающие новые возможности для применения перспективных материалов с особыми свойствами и позволяющие на их основе создать новые конструктивные решения.

Институт совместно с такими ведущими специализированными организациями Украины, как «Прогресс» и «Мотор Сич» (г. Запорожье), «Заря-Машпроект» (г. Николаев,) МНПО им. М. В. Фрунзе (г. Сумы), осуществляет исследовательские и опытно-промышленные работы по двум направлениям — создание ремонтных технологий с целью продления ресурса авиационных и газотурбинных двигателей и разработка технологий по реализации концепции получения цельносварных моноблоков ГТУ нового поколения на основе неразъемных соединений элементов ГТУ из перспективных материалов.

Продление ресурса ГТУ базируется на обосновании возможности и создании технологий многократного восстановления эксплуатационных характеристик сопловых и рабочих лопаток, элементов диска, жаровых камер, уплотнительных элементов и других высоконагруженных частей ГТУ. В институте совместно с промышленными предприятиями разрабатываются новые технологии восстановления и ремонта практически всех видов изделий из жаропрочных никелевых сплавов, в том числе сплавов нового поколения (на основе интерметаллидов) с содержанием γ -фазы до 70 % и более (рис. 16).

Освоены технологии соединения сплавов с поликристаллической направленной и монокристаллической структурой без нарушения их структурной

ориентации в месте соединения и с сохранением заданного уровня свойств.

В комбинации со специальными видами термообработки и нанесения современных функциональных покрытий удается увеличить ресурс элементов в действующих агрегатах в 1,5... 3,0 раза.

Создание цельносварных моноблоков ГТУ становится возможным благодаря применению новых технологий соединения, учитывающих свариваемость материалов. К ним относятся микроплазменная наплавка и напыление, реактивно-диффузионное соединение, сварка с использованием гибридных видов микроразряда. Институтом предложена новая концепция оценки свариваемости различных материалов, базирующаяся на том, что свариваемость является физическим свойством материала, которым можно управлять. На основе такого подхода созданы новые процессы, позволяющие получить моноблоки рабочих лопаток с диском (рис. 17) или рабочих колес (рис. 18) с высокими эксплуатационными характеристиками и ресурсом.

Сварка титана и титановых сплавов. Ведутся работы по созданию новых конструкционных хорошо свариваемых титановых сплавов для аэрокосмической техники, химического машиностроения, медицины и др. Разработан опытный сплав Т-110 ($Ti-5,5Al-1,2Mo-1,2V-4Nb-1,8Fe$), по уровню прочности не уступающий известному сплаву ВТ22 и хорошо свариваемый как при дуговом, так и при электронно-лучевом способах сварки. Сварные соединения сплава Т-110 после термической обработки имеют удовлетворительные характеристики пластичности при уровне прочности не менее 95 % этого показателя основного металла (1100 МПа), а долговечность сварных соединений при нагрузке 600 МПа составляет $5 \cdot 10^6$ циклов.

Стойкость в агрессивных средах является одной из важнейших характеристик титана, определяющих его широкое применение в химическом машиностроении. Наиболее высокой коррозионной стойкостью отличаются технический титан и его сплавы с палладием. Однако их прочность не превышает 500 МПа. Коррозионная стойкость высокопрочных промышленных титановых сплавов уступает по этому показателю техническому титану.

Исследования показали, что повысить прочность титана без снижения его коррозионной стойкости можно, если в качестве легирующих элементов использовать изоморфные β -стабилизаторы, в частности молибден, ванадий, ниобий. На этой основе разработан титановый сплав системы $Ti-4,5Al-2,5V-2,5Mo-3,5Nb-1,5Zr$, прочность которого (950 МПа) почти вдвое превышает прочность технического титана, а его коррозионная стойкость под напряжением не уступает этому показателю технического титана.

Теоретические и экспериментальные исследования в области химически чистых галогенидных



Рис. 17. Диск с рабочими лопатками

флюсов для сварки титана и сплавов на его основе легли в основу создания принципиально новых (применительно к титану) способов сварки. К ним относится автоматическая сварка плавящимся электродом под флюсом, электрошлаковая сварка титана, аргонодуговая сварка вольфрамовым электродом по слою флюса (А-ТИГ), сварка в узкий зазор магнитоуправляемой дугой.

Разработаны порошковые титановые проволоки и технологии сварки титана вольфрамовым электродом в аргоне. Этот процесс позволяет выполнять однопроходные швы без разделки кромок на титане толщиной до 16 мм. Созданы технологии механизированной сварки титана неплавящимся электродом и соответствующее оборудование для сварки в заводских и монтажных условиях. Ведутся исследования по активации металлургических процессов при электронно-лучевой сварке титана с помощью соответствующих флюсов.

Сварка композиционных, разнородных и трудно свариваемых металлов. Соединения разнородных и трудно свариваемых металлов требуют дозированного высококонцентрированного введения тепла в зону соединения с целью минимизации термического влияния на свойства основного металла и уменьшения возможности образования хрупких интерметаллидных фаз. Для решения этой задачи предложено использовать при контактной сварке давлением композиционные вставки и наноактиваторы, размещаемые между соединяемыми деталями. Состав материала и форма вставок рассчитываются так, чтобы иметь возможность повышать переходное сопротивление в стыке, что в свою очередь приводит к высококонцентрированному нагреву соединяемых деталей. Это претворяет их упрочнение и обеспечивает механические свойства на уровне одного из свариваемых металлов. Наноактиватор, используемый одновременно со вставками, защищает металл шва, а также способствует формированию вокруг околшовной зоны структур, свободных от оксидов, что уменьшает вероятность образования хрупких интерметаллидных фаз в соединении. Разработанная технология нашла применение при сварке дисперсно-упрочненной меди, алюминия со сталью и меди с вольфрамовыми сплавами (рис. 19).

Сварка взрывом. Изучены условия образования соединений при соударениях с минимально допустимыми скоростями. Результаты этих исследований используются для разработки «сходящих» технологических режимов сварки применительно к изготовлению элементов металлоконструкций, чувствительных к уровню остаточных пластических дефор-

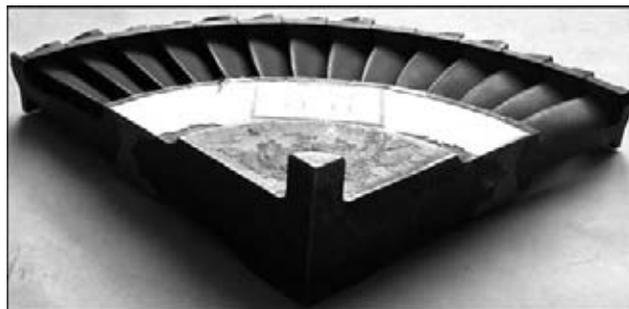


Рис. 18. Фрагмент рабочего колеса ГТУ

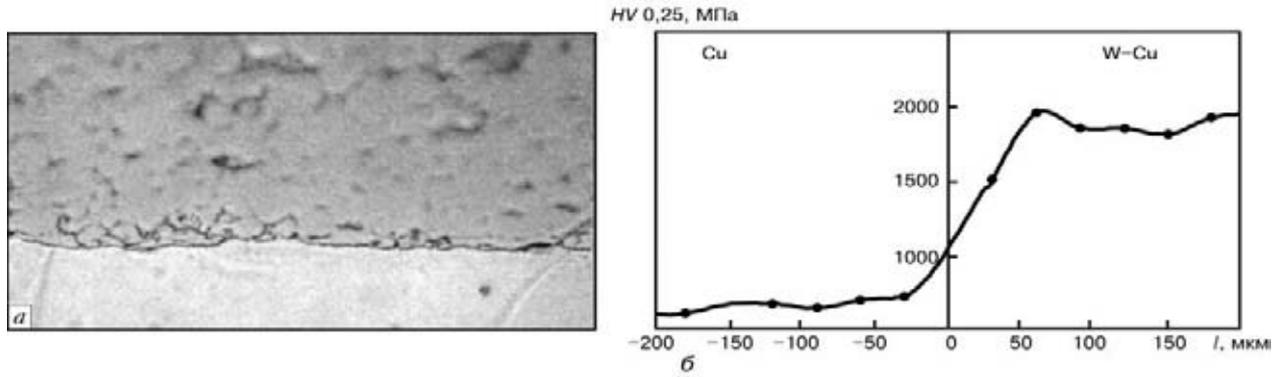


Рис. 19. Микроструктура металла соединения меди с вольфрамовым сплавом (а) и распределение микротвердости в нем (б); l — расстояние

маций и риску их разрушения. Определено влияние различий плотности и твердости при соединении разнородных материалов. Изучено влияние шероховатости соединяемых поверхностей и сформулированы рекомендации по рациональному выбору степени чистоты их механической обработки. Отработаны приемы химической подготовки соединяемых поверхностей при сварке высокопрочных алюминиевых сплавов с пониженной способностью к высокоскоростному пластическому деформированию. Показано, что предварительная химическая обработка позволяет соединить эти сплавы без промежуточных прослоек из более пластичного металла.

На рис. 20 в системе координат угол соударения—скорость точки контакта изображена типичная для металлов область свариваемости взрывом. Оптимальными являются технологические режимы, прилежащие к нижней границе этой области. Полученные результаты позволили разработать технологические режимы сварки взрывом в полосе (заштрихована) шириной в несколько градусов ниже традиционной нижней границы (рис. 20).

Основными пользователями разрабатываемых на основе проводимых исследований технологий являются электротехническая промышленность и цветная металлургия, нуждающиеся прежде всего в надежных биметаллических переходниках для высоконадежных электрических цепей. Для машиностроения и металлургии созданы технологии изготовления трубчатых переходников переменного сечения из разнородных металлов (рис. 21) и нанесения на крупногабаритные изделия защитных покрытий (антикоррозионные, износостойкие и жаростойкие).

Пайка. Традиционно большое внимание в институте уделяют фундаментальным и прикладным исследованиям в области пайки, в частности соединению перспективных трудносвариваемых материалов (интерметаллидных, дисперсно-упрочненных, жаропрочных никелевых сплавов), созданию тонкостенных, в том числе многослойных, конструкций. Разработаны новые припои для высоколегированных никелевых сплавов (например на основе системы Ni—Cr—Zr), имеющие новый качественный уровень по сравнению с традиционными и позволяющие значительно расширить объем применения конструкционной и ремонтной пайки в современном двигателестроении.

Созданы припои и технология пайки сплавов на основе интерметаллидов, в частности γ -TiAl. Проч-

ность соединений, полученных с использованием разработанных припоев, близка к таковой основного металла при комнатной и высокой (700 °С) температурах, а также при испытании на длительную прочность.

Разработаны припои, технология и оборудование пайки в вакууме решетчатых конструкций, например рулей ракет. Создание карусельной установки позволило значительно повысить производительность вакуумной пайки.

Большие перспективы для производства тонкостенных конструкций открывает дуговая пайка. Значительное снижение погонной энергии, отсутствие разбрызгивания, подрезов, хорошая поверхность швов — далеко не полный перечень ее преимуществ. Она позволяет, в частности, соединять оцинкованное железо без потери защитного слоя.

Весьма перспективными для промышленного применения являются результаты исследований в области пайки алюминия и его сплавов. Так, реактивный флюс для пайки алюминия позволяет паять без припоя. Последний образуется вследствие реакций компонентов флюса с алюминием. Новый флюс — хорошая основа для создания высокоэффективных технологий в серийном производстве автомобильных радиаторов, излучающих антенн и других изделий.

Защитные покрытия. Дальнейшее развитие получили работы в области нанесения функциональных покрытий различного назначения (износостойкие, коррозионно- и жаростойкие, биоактивные и др.) способами газотермического напыления, диффузионного насыщения и электроискрового легирования. Разрабатывается оригинальное оборудование

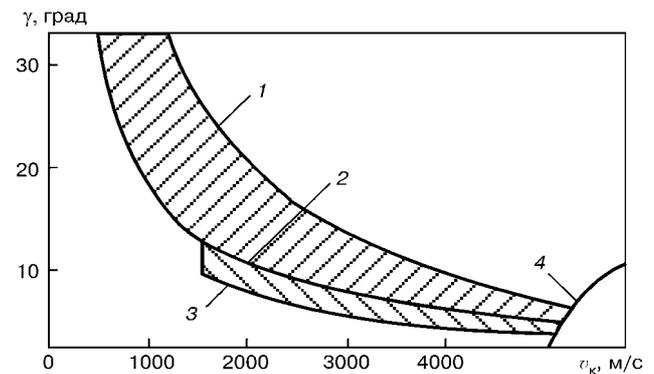


Рис. 20. Область свариваемости взрывом (СВ): 1 — верхняя; 2, 3 — нижние; 4 — звуковая границы СВ

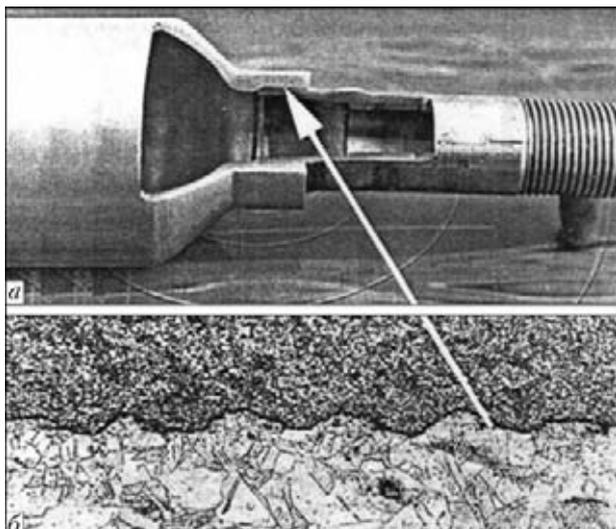


Рис. 21. Трубчатый переходник (а) и микроструктура металла соединения (б)

и материалы для получения покрытий (порошки, порошковые проволоки), технологии нанесения покрытий.

Разработанная установка для микроплазменного напыления МПН-004, отличающаяся малыми габаритами (масса 14 кг), низким уровнем шумовыделения (30... 50 дБ), малым размером пятна напыления (1,0... 5,0 мм), позволяет напылять покрытия из материалов широкого круга (металлы, сплавы, оксиды, карбиды и др.). Технология микроплазменного напыления биокерамических покрытий используется для нанесения биоактивных покрытий из гидроксипатита на различные типы эндопротезов (рис. 22). Установлена возможность получения таким путем текстурированных биокерамических покрытий. Наличие текстуры стимулирует процесс ресорбции (растворения) материала покрытия. Разработанная технология позволяет управлять фазовым составом и текстурой биокерамического покрытия, что обеспечивает возможность получения покрытий с оптимальными свойствами.

Работы в области квазикристаллических покрытий, наносимых способом сверхзвукового воздушно-газового напыления (установка «Киев-С»), привели к созданию покрытий с теплопроводностью

1,5... 2,0 Вт/(м·град), перспективных для использования в качестве теплозащитных, в частности в двигателях внутреннего сгорания, изготовляемых из алюминиевых сплавов.

Ведутся работы по развитию гибридной лазерно-дуговой технологии получения покрытий, отличающейся возможностями объединения процессов нанесения покрытий и синтеза в газовой фазе, например для осаждения алмазных и алмазоподобных покрытий.

Ресурс безопасной эксплуатации сварных конструкций

Определенный ресурс безопасной эксплуатации современных сварных конструкций закладывается еще на стадии их проектирования и изготовления. Однако при длительной эксплуатации ответственных конструкций (мостов, магистральных трубопроводов, крупных нефте- и газохранилищ и т. д.) ресурс их эксплуатации периодически определяют на основе мониторинга реальной нагруженности конструкций; технической диагностики их состояния с позиций наличия дефектов несплошности и формы, уровня остаточных нерелаксированных напряжений, степени изменения характеристик сопротивления материала в горячих точках под влиянием тех или иных видов нагружения; расчетных кодов, связывающих нагруженность и результаты технической диагностики для комплексного определения ресурса безопасной эксплуатации.

В сварных конструкциях «горячими точками» зачастую являются сварные соединения. В институте интенсивно ведутся работы, связанные с созданием расчетных кодов для сварных соединений на основе современных подходов механики разрушения с учетом рекомендаций Международного института сварки, Американского института нефти и др. Пример такой работы — создание совместно с Госнефтегазпромом ведомственных строительных норм Украины «Расчеты на прочность действующих магистральных трубопроводов с дефектами» (ВБН В.2.3-00018201.04-2000).

Традиционно институт много внимания уделяет определению остаточных напряжений в различных сварных соединениях и узлах. Успешно используется комбинированный метод, основанный на мате-

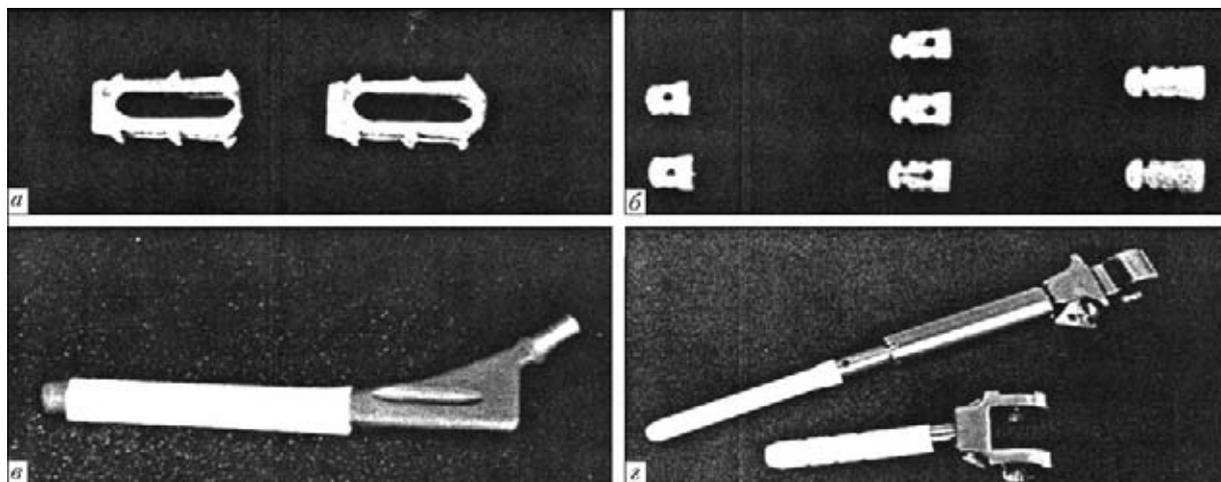


Рис. 22. Эндопротезы с микроплазменными биокерамическими покрытиями: а — межпозвонковый; б — зубные; в — тазобедренный; з — коленный

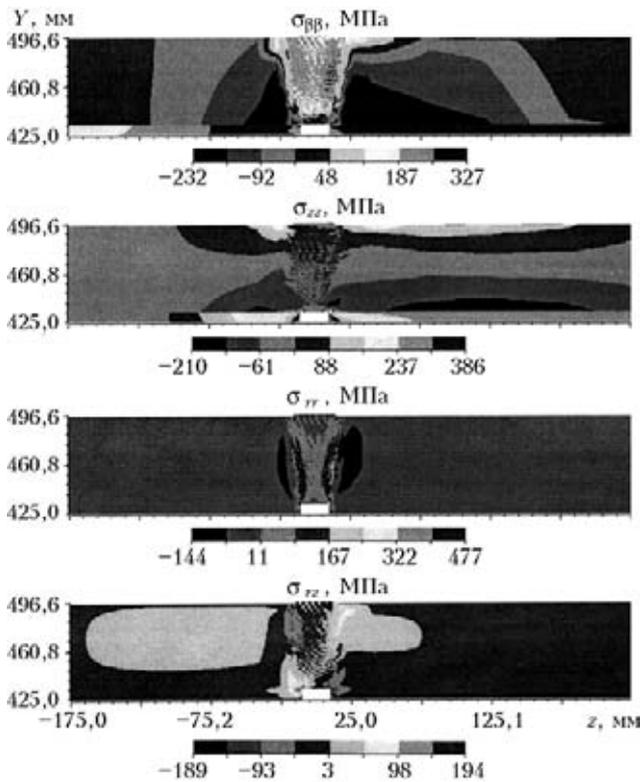


Рис. 23. Расчетные данные по распределению остаточных сварочных напряжений после сварки и отпуска кольцевого стыка труб Ду 850

математическом моделировании кинетики образования остаточных напряжений при сварке и последующей термической обработке во всем объеме сварного узла в сочетании с экспериментальными измерениями в доступных поверхностях исследуемого узла. Такой подход был осуществлен применительно к сварным соединениям труб Ду 850, с помощью которых парогенератор атомного реактора ВВЭР-1000 крепится к трубопроводу первого контура.

На рис. 23 приведены расчетные данные по распределению остаточных напряжений $\sigma_{\phi\phi}$ (окружных), σ_{zz} (поперечных), σ_{rr} (радиальных), σ_{rz} (касательных).

На рис. 24 видно достаточно хорошее согласование расчетных и экспериментальных данных для наружной поверхности (доступной для измерений) относительно $\sigma_{\phi\phi}$ и σ_{zz} , что является основой валидации расчетных данных.

Создан новый оперативный метод и компактная автоматизированная аппаратура для неразрушающей оценки напряженного состояния, обусловленного как изготовлением конструкций, так и эксплуатационными нагрузками. Суть технологии состоит в создании новой неразрушающей оценки упругой разгрузки напряжений (релаксации) на основе введения высокоплотного импульса тока в контролируемый участок и бесконтактного определения поля перемещений в зоне релаксации методом электронной спекл-интерферометрии (рис. 25).

Компьютерная автоматизированная система позволяет вычислить напряжения на основе данных о перемещениях в локальной зоне релаксации.

Одной из новых технологий оценки работоспособности сварных конструкций, разработанных в институте, является технология на основе квантовой

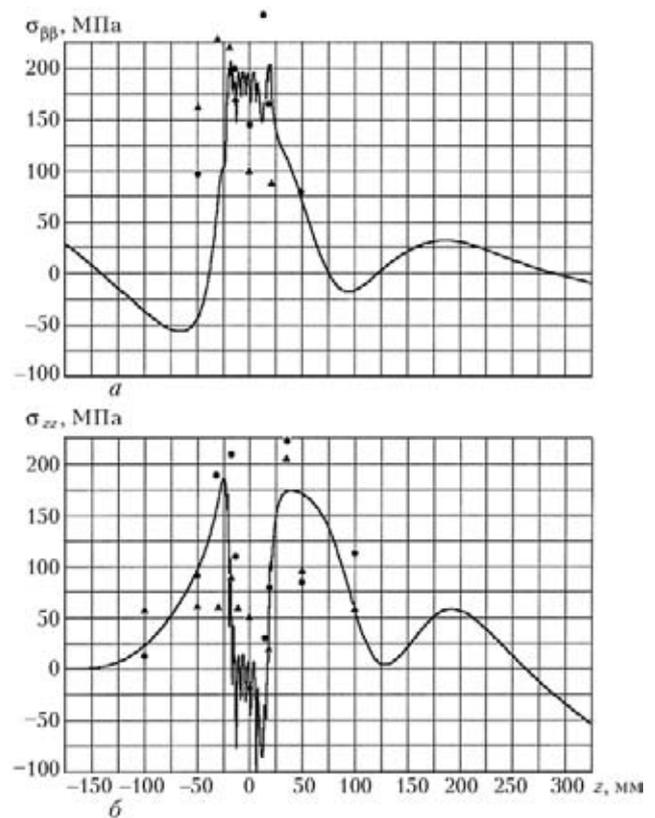


Рис. 24. Сопоставление расчетных кривых остаточных напряжений $\sigma_{\phi\phi}(z)$ (а) и $\sigma_{zz}(z)$ (б) на наружной поверхности в зоне стыка труб Ду 850 после высокого отпуска с экспериментальными данными

механики разрушения, использующая наряду с традиционными параметрами, характеризующими состояние материалов, данные его акустической эмиссии, излучаемой материалом в процессе деформирования. Использование новой технологии целесообразно при акустической эмиссии в объеме 100%-го контроля конструкций и их узлов. Работы по контролю с использованием данной технологии могут выполняться без остановки производства и предполагают автоматическую оценку опасности обнаруженных дефектов.

Применение разработанной технологии для контроля материалов конструкций позволяет осуществить 100%-й контроль конструкций и их узлов без разрушения, заблаговременно определить разрушающую нагрузку, оценить остаточный ресурс материала конструкции. За последние 12 лет использования разработанной технологии в различных отраслях промышленности разных стран испытано более 1000 конструкций (объекты энергетики, химической промышленности, газотранспорта и аммиакопроводы).

Большое будущее, на наш взгляд, у диагностических систем непрерывного мониторинга конструкций, позволяющих в течение длительного времени непрерывно получать информацию о состоянии конструкций. Такие системы уже более трех лет работают на некоторых предприятиях Украины. На рис. 26 показан непрерывный мониторинг типичной конструкции крупногабаритного хранилища аммиака объемом 34 тыс. м³ и аммиакотрубопровода длиной 1000 м на мосту через реку Днепр.

Расширение областей применения алюминиевых сплавов в сварных конструкциях зависит от обес-

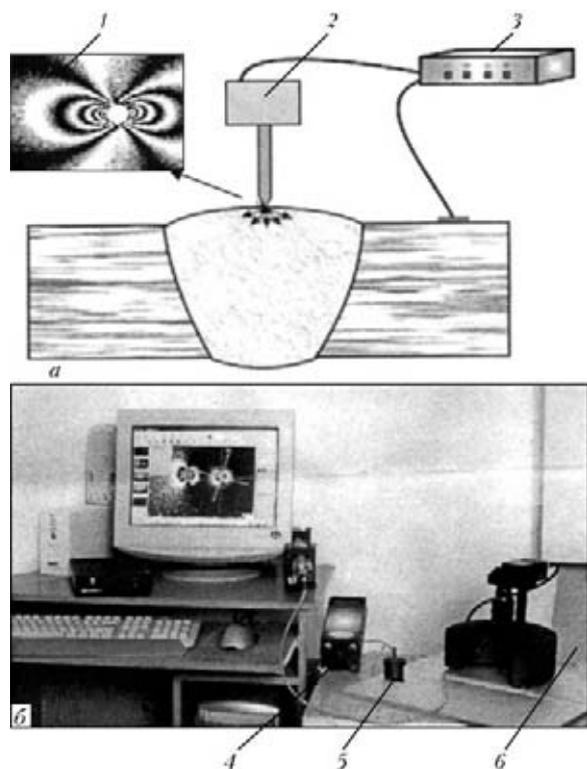


Рис. 25. Схема (а) и аппаратное оформление (б) метода оценки напряженного состояния: 1 — интерференционная картина, характеризующая остаточные напряжения; 2, 5 — устройство ввода импульсов тока; 3 — генератор импульсов; 6 — спекл-интерферометр

печения требуемого сопротивления соединений усталостным разрушениям. Циклическая долговечность сварных соединений алюминиевых сплавов составляет около 40 % соответствующего показателя соединений конструкционных сталей. Поэтому сварные алюминиевые конструкции в большей степени, чем стальные, нуждаются в послесварочной обработке. Исследования показали, что эффективным способом послесварочной обработки сварных соединений алюминиевых сплавов может стать поверхностное пластическое деформирование зоны перехода от шва к основному металлу высокочастотной механической проковкой. Иллюстрацией этого служат результаты усталостных испытаний стыковых сварных соединений алюминиевого сплава АМг6 в исходном состоянии, после механической зачистки выпуклости и высокочастотной механической проковки с применением технологического оборудования со сравнительно небольшой потребляемой мощностью (до 0,3 кВт) с пьезокерамическим преобразователем (рис. 27). Повышение сопротивления усталости стыкового соединения алюминиевого сплава АМг6 после обработки, по сравнению с исходным состоянием, в зависимости от асимметрии цикла составило 45... 100 %.

Ультразвуковой контроль (УЗК) является одним из основных способов обнаружения внутренних дефектов в сварных соединениях. Традиционно он реализуется с помощью пьезоэлектрических преобразователей. В качестве иллюстрации успешного применения УЗК может служить серия автоматизированных установок с системой УЗК с компью-

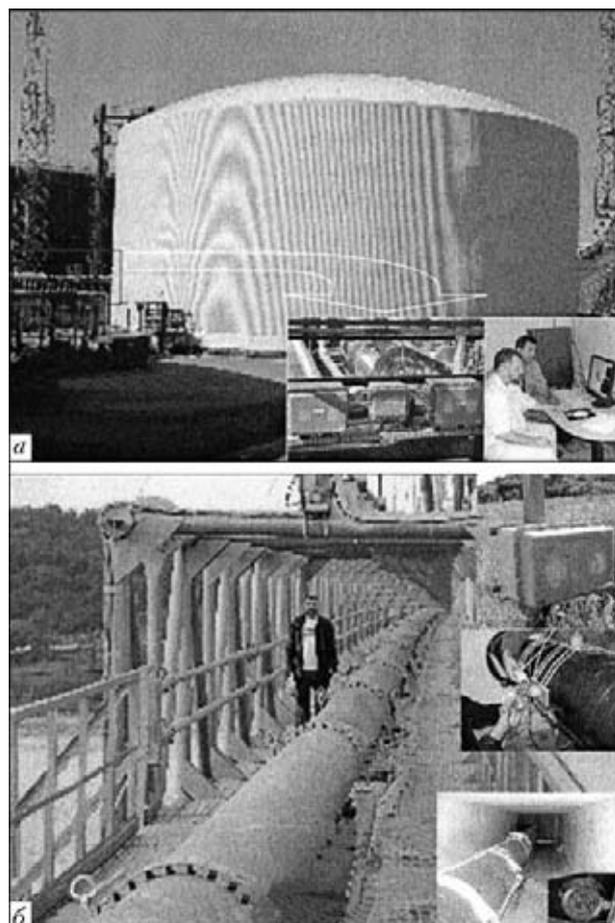


Рис. 26. Непрерывный мониторинг хранилища аммиака (а) и аммиакотрубопровода на мосту через Днепр (б)

терным управлением, разработанных и изготовленных в институте для Выксунского металлургического комбината (рис. 28). Они обеспечивают автоматизированный УЗК концов труб диаметром 508... 152 мм по всей толщине стенки 7... 50 мм, выявление дефектов типа «расслоение» на ширине 60 мм от торца, продольно ориентированных дефектов типа «трещина» на ширине 30 мм от торца трубы, а также продольных швов прямошовных сварных труб.

В институте впервые установлено, что в ряде случаев для УЗК сварных соединений и листовых конструкций более целесообразно использовать электромагнито-акустические преобразователи (ЭМАП), исключая необходимость в промежуточной акустической среде (контактной жидкости), но позволяющие возбуждать особые горизонтально-поляризованные поперечные волны. Это дает возможность производить УЗК изделий с грубой поверхностью без опорожнения объекта и при наличии остатков изоляции инородных наслоений. Испытания показали, что с достоверностью 97 % выявляются все естественные дефекты (округлые, протяженные разной ориентации) без влияния на результаты УЗК формы валика усиления сварного соединения. Кроме того, отпадает необходимость в ожидании остывания металлоконструкции после сварки. ЭМАП могут работать при температуре от -50 до 170 °С. Полученные результаты свидетельствуют о перспективности расширения областей использования УЗК.

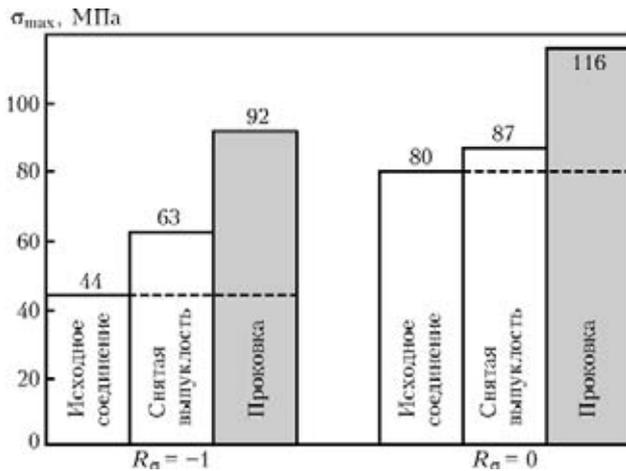


Рис. 27. Изменение значений предела ограниченной выносливости σ_{max} при $T = 1 \cdot 10^5$ циклов в зависимости от способа обработки сварного соединения сплава АМгб и асимметрии цикла R_n переменных напряжений

Некоторые проблемы транспорта природного газа

Институт занимается совершенствованием монтажной сварки магистральных трубопроводов, сварочными материалами, созданием аппаратов для монтажной дуговой сварки, а также другими работами, лишь отчасти связанными со сваркой.

Повышение эффективности газотранспортных систем. Газотранспортные системы России и Украины являются энергетическими объектами планетарного масштаба. Природный газ, транспортируемый в магистральных трубопроводах, удовлетворяет потребность в энергии промышленности и социальной инфраструктуры целого континента.

Так, только один трубопровод диаметром 1,4 м транспортирует газ до 800 кг/с при средней скорости движения газа в трубопроводе около 40 км/ч. За год один трубопровод транспортирует массу газа, эквивалентную по энергии 340 млрд кВт·ч (примерная производительность трубопровода 10000 кВт·ч/с).

При подобном масштабе транспортируемой, а, значит, и потребляемой энергии чрезвычайно актуальны проблемы снижения любых видов потерь и повышения эффективности работы газотранспортной системы, с одной стороны, и утилизации тепловых вторичных энергетических ресурсов, связанных с потерями в газоперекачивающем оборудовании, — с другой. Последнее очень важно для соблюдения экологических требований, предъявляемых к мощным энергетическим объектам (Киотский протокол).

В среднем для транспортирования газа в упомянутом магистральном газопроводе на каждые 120...150 км устанавливается компрессорная станция суммарной механической мощностью на валу около 50 МВт.

В настоящее время эффективным является использование на компрессорных станциях газотурбинных установок мощностью на валу 10, 16 и 25 МВт. Современные затраты топливного газа на один газотурбинный двигатель составляют до $(2...3) \cdot 10^3$ кг/ч. Удельный расход газа на получение механической мощности лежит в пределах 0,33...0,35 м/(кВт·ч).

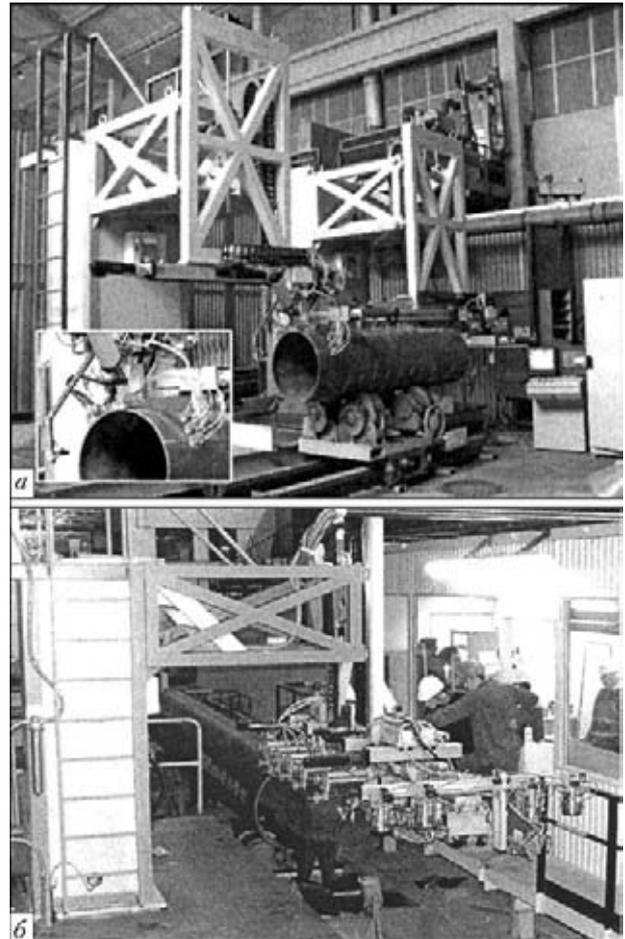


Рис. 28. Установки НК 360 (а) и НК 362 (б) для автоматизированного УЗК труб

Затраты только на топливный газ для работы турбин нагнетателей газа компрессорных станций одного трубопровода длиной до 1500 км составляют около 150 млн дол. США. При этом газотурбинные двигатели выбрасывают в окружающую среду из теплового тракта приблизительно 180 кг/с продуктов сгорания при температуре 400...550 °С. Коэффициент полезного действия этих энергетических установок составляет не более 32 %, что свидетельствует о масштабах выбросов в атмосферу тепловой энергии компрессорных станций, составляющих около 60...70 % потребляемой ими энергии (или до 100 МВт тепловой энергии). При этом непосредственно из теплового тракта газотурбинных двигателей выбрасывается до 60 МВт тепловой мощности. Эту энергию на каждой компрессорной станции можно использовать для дополнительного производства около 16...25 МВт электроэнергии и многих других целей.

Другой эффективный путь — это выработка холода с помощью установок, утилизирующих тепло газотурбинных двигателей. Использование этих установок для охлаждения транспортируемого газа позволит примерно на 8...10 % повысить производительность магистральных трубопроводов, компенсировать затраты электроэнергии на привод вентиляторов аппаратов воздушного охлаждения газа, обеспечить собственные потребности компрессорной станции в электроэнергии, а также сэкономить топливный газ, потребляемый газотурбинными двигателями.

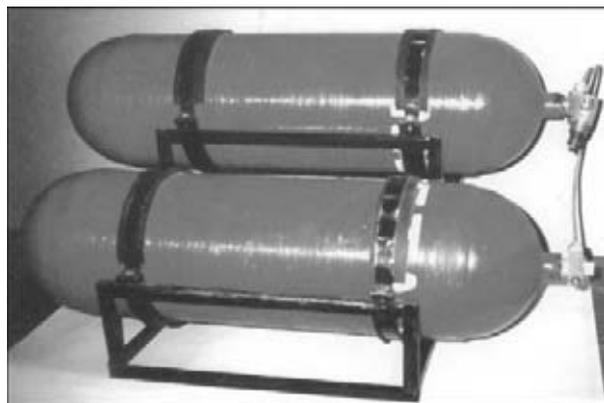


Рис. 29. Облегченные металлопластиковые баллоны для транспортных средств

Зимой возможно производство дополнительной энергии для потребностей предприятий, жилых комплексов или сельскохозяйственных производств, расположенных около компрессорных станций.

Только в газотранспортной системе Украины экономия затрат на транспортирование газа на 5... 10 % даст значительный экономический эффект, снизит экологическую нагрузку на окружающую среду, улучшит энергетическую обеспеченность и условия жизни населения вблизи компрессорных станций. При этом будет повышена пропускная способность трубопроводов. Для газотранспортной системы России этот эффект будет существенно больше.

Над решением этой проблемы наряду с учеными ИЭС им. Е. О. Патона работают сотрудники Института технической теплофизики и Института газа НАН Украины, а также Одесской государственной академии холода, ОАО «ИГШ «ВНИПИТРАНСГАЗ» и ОАО «Сумское МНПО им. М. В. Фрунзе».

Облегченные металлопластиковые баллоны для транспортных средств (рис. 29). Мировой автопарк вносит более 70 % загрязнений атмосферы, поэтому весь мир уделяет большое внимание применению природного газа-метана в качестве альтернативного экологически чистого моторного топлива. Наряду с экологической безопасностью применение природного газа стимулируют его цена и значительные природные запасы. Одной из причин, сдерживающих широкое применение газа на транспорте, является большая масса баллонов высокого давления.

В настоящее время на рынке в основном предлагаются три типа баллонов — металлические, пластиковые и металлопластиковые.

Баллоны первого типа, лучшие варианты которых имеют коэффициент массового совершенства M/V около 1,25 кг/л, изготавливаются из бесшовных цельнотянутых труб.

У баллонов второго типа этот показатель значительно лучше — около 0,3 кг/л, но высокие цены на конструкционные материалы и трудоемкость изготовления обуславливают их высокую стоимость — до 20 дол./л.

Более универсальны баллоны третьего типа. Они имеют несущий газонепроницаемый металлический корпус и упрочняющую композиционную оболочку. Значительного снижения массы и трудоемкости изготовления можно добиться путем применения высокопрочных сталей и композиционных материалов, характеризующихся высокой удельной прочностью. В ИЭС им. Е. О. Патона разработана новая технология изготовления относительно дешевых легких баллонов, корпуса которых выполнены из высокопрочных сталей, а упрочняющая композиционная оболочка — кольцевой намоткой. Баллоны рассчитаны на рабочее давление 20 МПа с запасом прочности 3,1 при M/V около 0,6 кг/л, на срок эксплуатации более 15 лет и имеют безосколочное разрушение при давлении менее 60 МПа и простреле пулей калибра 7,62 мм.

Металлический корпус этих баллонов изготавливается из высокопрочной листовой стали. Сварку обечайки, днищ и горловины выполняют по технологии, гарантирующей получение сварных соединений, равнопрочных с основным металлом.

Усиление цилиндрической части баллона композиционным материалом позволяет снизить его массу и повысить работоспособность при многократных заправках без уменьшения коэффициента запаса прочности, а также исключить возможность осколочного разрушения.

По конструкции, материалам, трудоемкости и весовым параметрам баллон ИЭС им. Е. О. Патона не уступает лучшим мировым образцам и отличается от них недефицитностью материалов, стабильностью массы, чистотой и однородностью внутренней поверхности, повышенной коррозионной стойкостью и долговечностью при многоцикловых нагрузках. Технологический процесс позволяет без существенного переоборудования производства изготавливать баллоны различных типоразмеров. Баллоны могут быть использованы не только на транспорте, но и в коммунальной сфере, сельскохозяйственной технике, при аварийно-спасательных работах. В настоящее время серийное производство таких баллонов осваивают на трех предприятиях Украины.

В заключение следует отметить, что сварка и родственные процессы продолжают интенсивно и всесторонне развиваться. Создаются теоретические предпосылки для разработки и использования новых технологий, усовершенствованных материалов для изготовления изделий как в традиционных областях сварочного производства, так и в других, которые раньше считались экзотическими. И в XXI веке сварка и родственные процессы сохраняют ведущую роль во многих областях деятельности человека.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев

Поступила 06.06.2005