

## СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОННО-ЛУЧЕВОЙ СВАРКИ КОНСТРУКЦИЙ\*

Академик **Б. Е. ПАТОН**, **А. А. БОНДАРЕВ**, д-р техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Рассмотрен ряд оригинальных технологических разработок, выполненных специалистами Института электросварки им. Е. О. Патона за период с 1969 по 2003 гг. На примере конкретных конструкционных материалов показаны преимущества процесса сварки электронным пучком. Даны рекомендации по проектированию технологического процесса сварки в условиях промышленного предприятия. Приведены примеры новых технологических разработок, включая сварку высокопрочных алюминиевых сплавов, легированных литием, скандием, сварку разнородных и композиционных материалов.

*Ключевые слова:* электронно-лучевая сварка, алюминиевые сплавы, программирование, тепловложение, сварные конструкции, разнородные материалы, композиционные материалы, диспергирование, технология производства, дискретное сканирование

Процесс электронно-лучевой сварки (ЭЛС) относится к категории высоких технологий и в основном применяется при изготовлении конструкций, к которым предъявляются высокие требования по качеству, прочности и надежности сварных соединений. За прошедшие более чем 45 лет с момента первого промышленного внедрения он широко применяется в ракетно-космической технике, энергетике, авиа-, судо-, приборостроении и др. [1, 2].

В Институте электросварки им. Е. О. Патона (ИЭС) разработаны и внедрены в промышленное производство технологии изготовления крупнокорпусных конструкций и топливных баков баллистических ракет [3–6], ракет морского базирования [7–10] и крылатых ракет [11, 12]. Электронным пучком свариваются крыльевые устройства судов на подводных крыльях. Как окончательная сборочно-сварочная операция этот способ используется при производстве гироскопов пусковых платформ, современных танков, судовых навигационных систем [13–15]. С использованием ЭЛС изготавливаются толстостенные оболочечные конструкции ядерных комплексов и тонкостенные элементы устройств СВЧ техники. ЭЛС алюминиевых сплавов находит широкое применение в производстве конструкций, к которым предъявляются повышенные требования по прочности, плотности соединений, работающих в условиях знакопеременных нагрузок, глубокого вакуума и криогенных температур. Примеры таких конструкций представлены на рис. 1–4. Экономически целесообразно применение процесса ЭЛС изделий в условиях их массового изготовления, например, при сварке поршней с полостью масляного охлаждения фор-

сированных дизелей (рис. 5). Примером применения ЭЛС как финишной операции является сварка корпусов и «поплачков» гироскопов (рис. 6). При этом обеспечиваются высокое качество и точность изготовления изделий, которых невозможно достичь при использовании других способов сварки. Особенно эффективен этот способ при изготовлении крупногабаритных конструкций, имеющих однотипные сварные соединения. При этом

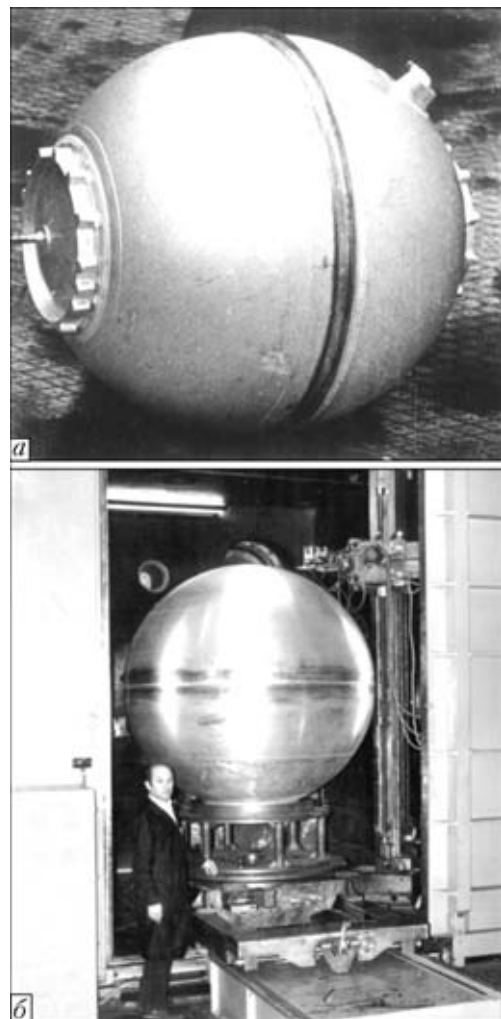


Рис. 1. ЭЛС шаровых емкостей из алюминиевых сплавов диаметром 600 (а) и 2000 (б) мм

\*Материалы настоящей статьи в сокращенном варианте доложены на 6-й Международной конференции «Лучевые технологии», состоявшейся 20–28 апреля 2004 г. в г. Галле, Германия (см. сборник докладов «Strahltechnik», Vorträge der 6. Konferenz «Strahltechnik» in Halle vom 20 bis 28 April 2004. — DVS SLV, GDL. — S. 75–79).

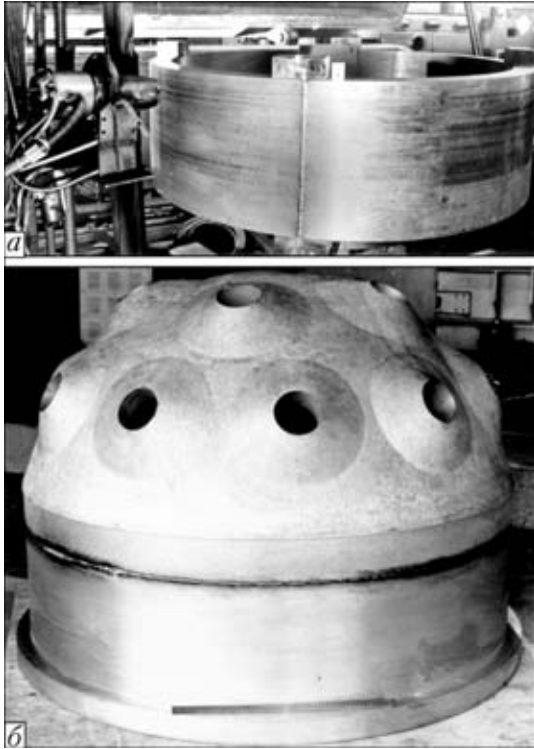


Рис. 2. ЭЛС обечайки (а) и полусферы (б) из сплава 1201 с толщиной свариваемых кромок 90 и 100 мм

реализован способ сварки с локальным вакуумированием стыка. По такой технологии изготавливали обечайки большого диаметра, имеющие несколько продольных стыковых соединений [16, 17], а также толстолистовые полотнища заготовок днищ железнодорожных цистерн из чистого алюминия [18]. Для изготовления оболочек из тонколистовых ребристых панелей разработана технология их сварки с предварительным упругим растяжением свариваемых элементов (рис. 7). Этот перечень можно продолжить, но главным остается принцип учета тех критериев и оценок, по которым следует



Рис. 3. Внешний вид фрагмента крупногабаритной обечайки из сплава АМгб диаметром 1145 мм и толщиной свариваемых кромок 90 мм

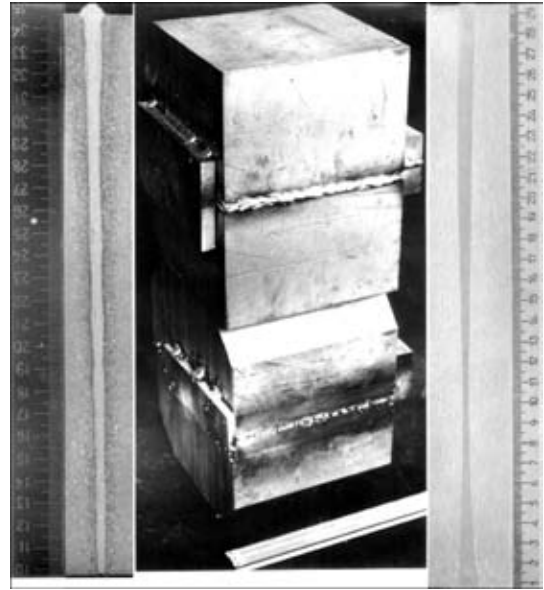


Рис. 4. Внешний вид макетов стыкового соединения большой толщины со стороны шва, а также макрошлифы поперечных сечений соединения сплава 1201 толщиной 250 мм (слева) и сплава АМгб толщиной 300 мм (справа). Сварка выполнена за один проход горизонтальным пучком на подъем

сделать выбор в пользу применения ЭЛС. Сегодня инженеры-технологи и конструкторы, к сожалению, не всегда в полном объеме владеют информацией, характеризующей возможности этого процесса сварки. Накопленный в ИЭС им. Е. О. Патона опыт в этой области позволяет обобщить и сформулировать его основные отличительные черты и преимущества:

- повышение прочностных характеристик соединений на 15...25 % по сравнению с процессами дуговой сварки;

- малая ширина металла ЗТВ и, как следствие, снижение весовых характеристик изделий;



Рис. 5. Типоразмерный ряд сварных поршней (а) и макрошлиф головки поршня с полостью масляного охлаждения и упрочняющей наплавкой зоны верхней компрессионной канавки, выполненных ЭЛС (б), [19]

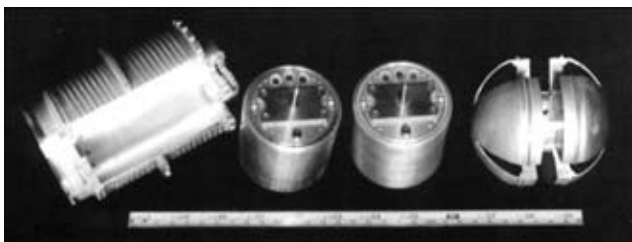


Рис. 6. Корпуса электровакуумных приборов из алюминиевых сплавов, изготовленные с применением ЭЛС, [20]

высокая стабильность геометрических форм и размеров конструкций, особенно когда ЭЛС является финишной операцией изготовления изделий;

высокое качество сварных соединений;

отсутствие оксидных включений и включений вольфрама; удаление вредных примесей с парами металла; мелкокристаллическая структура металла шва и сохранение его структуры в металле ЗТВ и т. д.;

возможность сварки конструкций при отсутствии доступа к обратной стороне стыка; на весу малых толщин; в различных пространственных положениях, в том числе с одновременной подачей в сварочную ванну присадочной проволоки;

низкий уровень общего разогрева конструкций и возможность одновременного вакуумирования внутреннего объема, особенно при герметизации приборов;

независимость качества сварных соединений от человеческого фактора, высокая чистота, вакуумная гигиена и экологичность процесса;

высокая производительность процесса сварки при скоростях до 120 м/ч и выше, возможность реализации групповой технологии при одновременной загрузке в камеру партии изделий;

полная автоматизация всех операций по управлению источником питания, вакуумными агрегатами, манипуляторами, аппаратурой управления пучком и диагностикой качества;

экономичность по сравнению с аргодуговой (АДС) или плазменной сваркой (нет необходимости в применении защитных газов, вольфрамовых электродов, подготовке разделки кромок при сварке больших толщин);

возможность выполнения некоторых типов соединений, которые невозможно выполнить другими способами сварки.

Для освоения процесса ЭЛС в условиях промышленного производства необходимо осуществить целый ряд мероприятий, основной перечень которых представлен на рис. 8. При этом основное внимание должно быть уделено оснащению установки ЭЛС и энергокомплекса современными средствами управления на основе компьютерной техники с соответствующим программным обеспечением. Только при таком решении влияние человеческого фактора и внешних условий на качество изделий будет минимальным [21].

Сегодня появляются новые конструкционные материалы с уникальными характеристиками. К ним в первую очередь можно отнести уже широко используемые в авиационной, аэрокосмической и оборонной технике алюминиево-литиевые сплавы,

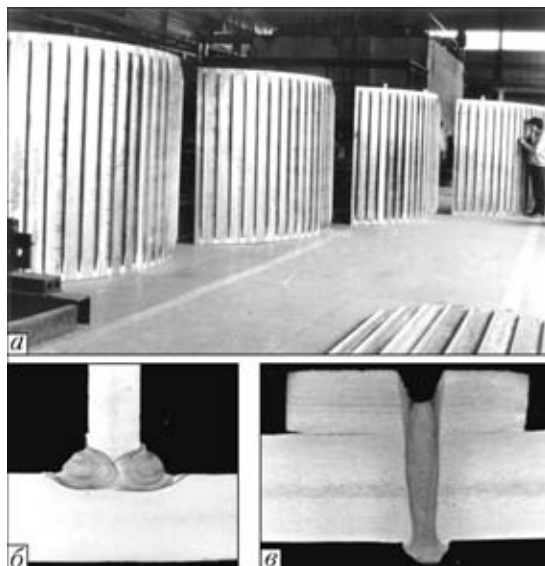


Рис. 7. Внешний вид опытной партии стрингерных панелей из сплава АМг6В, выполненных с предварительным упругим растяжением (а); макрошлифы соответственно двухстороннего таврового соединения приварки ребра (б) и стыкового соединения полотнища при укрупнении панелей (в)

композиционные материалы с алюминиевой матрицей, пеноалюминий, материалы с наноструктурой и др. Одновременно продолжают совершенствоваться и технологии, а также оборудование и аппаратура управления установок для ЭЛС. Это обусловлено тем, что, как и при использовании уже известных технологий, при сварке новых конструктивных материалов необходимо обеспечить максимально возможные прочностные и эксплуатационные характеристики соединений и конструкций в целом. С этой целью в ИЭС им. Е. О. Патона разработан принципиально новый технологический процесс ЭЛС, который отличается возможностью контролируемого тепломассопереноса в условиях сформировавшегося объема жидкого металла сварочной ванны. При любом из известных способов сварки плавлением управление потоками жидкого расплава в сварочной ванне дает возможность эффективно повышать качество и плотность формируемых соединений. При ЭЛС алюминиевых сплавов, у которых на поверхности находится оксидная пленка, насыщенная влагой, а в основном металле, кроме растворенного водорода, присутствуют легирующие элементы такие, как цинк, магний, литий, имеющие в условиях вакуумной камеры высокую упругость пара, управление микрокапиллярными процессами и температурным состоянием в пределах сварочной ванны приобретает особое значение.

Основой разработанной технологии является прибор управления электронным пучком — программатор, позволяющий осуществлять дискретное сканирование пучка электронов по любой заданной траектории с периодическими его остановками на ней и с управляемым временем задержки в точках дискрета по заранее разработанной программе. Управление процессом осуществляется с использованием современной компьютерной техники, а сам программатор приспособлен для работы с любым источником питания и независимо от фирмы-про-

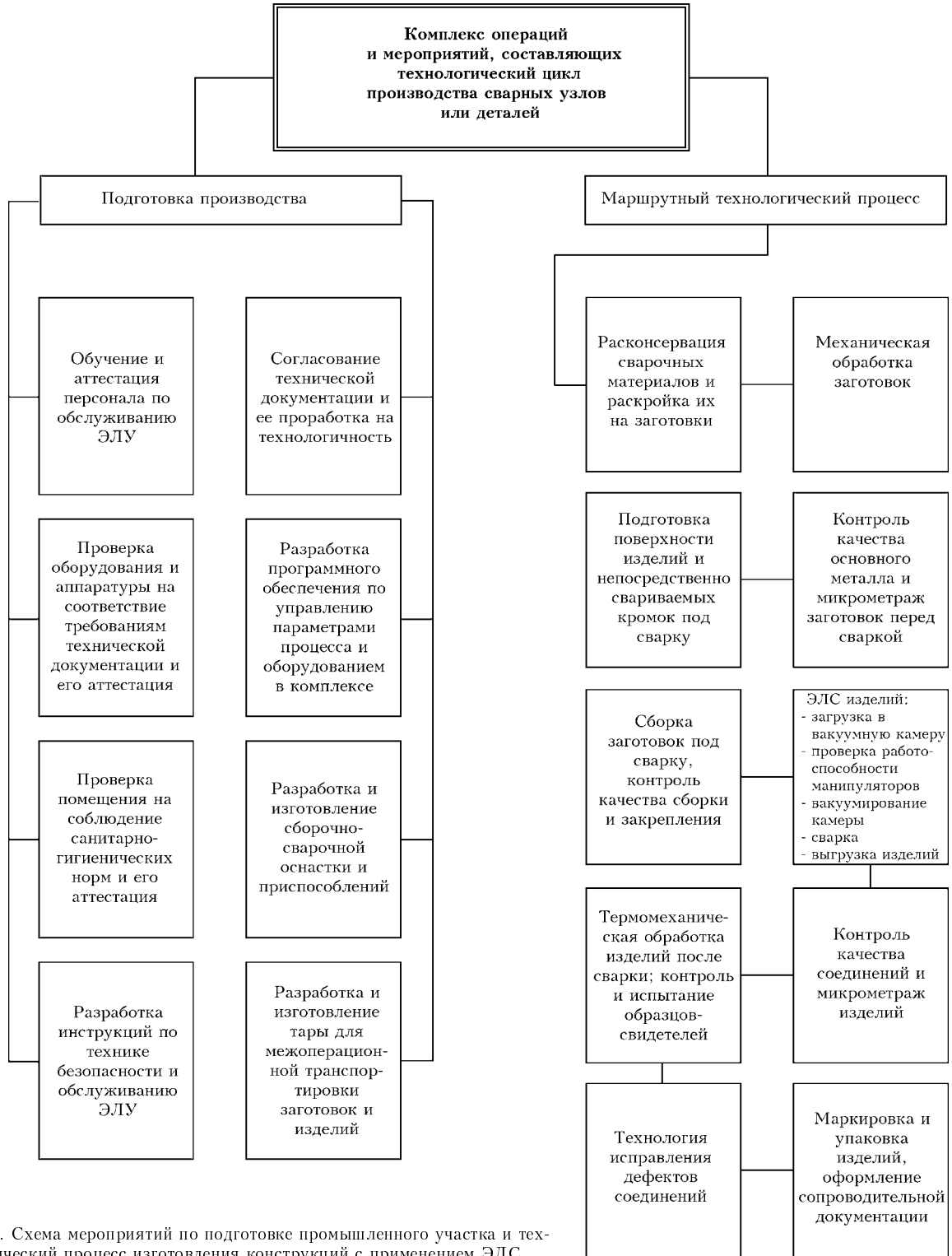


Рис. 8. Схема мероприятий по подготовке промышленного участка и технологический процесс изготовления конструкций с применением ЭЛС

изготовителя энергокомплекса. С использованием разработанной аппаратуры и программного обеспечения появилась возможность на более высоком уровне решать многие конструкторские и технологические проблемы [22]. Управление распределением плотностью мощности пучка в пятне нагрева позволяет, например:

управлять тонкой структурой металла шва и на этой основе повышать механические свойства соединений;

избегать анизотропии прочностных характеристик в соединении при сварке стыков с большой толщиной свариваемых кромок;

получать соединения с равной шириной шва по толщине кромок и за счет этого уменьшать остаточные угловые деформации;

выполнять сварку соединений с большим зазором в стыке без проникновения пучка электронов в зазор;

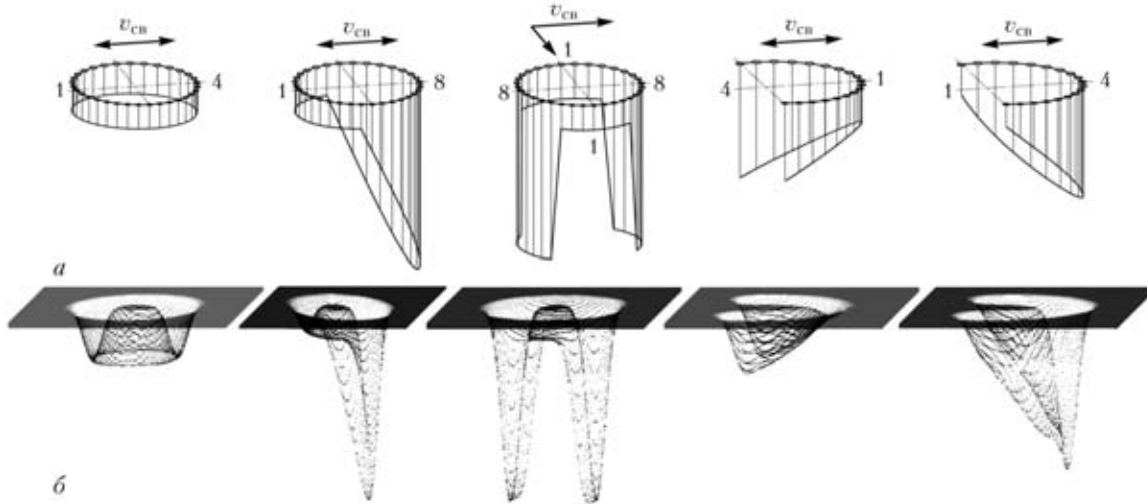


Рис. 9. Технологические схемы дискретного сканирования электронного пучка (а) и диаграммы пространственного распределения плотности мощности (б) (цифры — относительное время задержки пучка в точках дискрета на контуре сканирования)

выполнять сварку разнородных или разноименных материалов, имеющих разные теплофизические характеристики, за счет обеспечения разного тепловложения по кромкам стыка;

получать соединения при разнотолщинности кромок в соотношении 1:50 и более;

выполнять сварку стыков с одновременной подачей присадочной проволоки с любой стороны сварочной ванны относительно направления перемещения пучка;

выполнять сварку соединений с неполным проваром без образования корневых дефектов, а также при сварке кольцевых швов избежать образования дефектов на участке вывода кратера и перекрытия шва;

выполнять модифицирование поверхностных слоев деталей с легированием поверхностного слоя без перемешивания с матричным материалом.

Технологические схемы дискретного сканирования пучка и диаграммы пространственного распределения плотности мощности, представленные на рис. 9, построены с использованием компьютера и разработанного программного обеспечения [23–26]. Составление программы для выполнения сварки конкретного соединения (с обеспечением предъявляемых требований к качеству формирования и плотности швов) оператор-сварщик выполняет в соответствии с разработанным алгоритмом, самостоятельно устанавливает все необходимые параметры дискретного сканирования (вид траектории, количество точек на ней, очередность перемещения пучка из точки в точку, амплитуду развертки, время задержки пучка в каждой из точек дискрета и т. д.) и на мониторе в режиме визуального проектирования контролирует результат реализации выбранной программы (рис. 10). После установления основных параметров процесса сварки спроектированная программа запускается оператором на автоматическое ее выполнение в режиме реальной сварки изделий без участия оператора. Способ сварки электронным пучком с программированием распределения плотности мощности в пятне нагрева дает возможность при неизменных значениях параметров мощности пучка и

погонной энергии получать соединение такой формы и структуры, которые невозможно воспроизвести при других способах сварки плавлением.

На рис. 11 показаны примеры асимметричного проплавления шва сплава АМг6 при круговой развертке пучка диаметром 5 мм и переплав порошкообразной присадки на поверхности лопатки из сплава ЧС70 при ширине одновременно обрабатываемой зоны в поперечном сечении до 40 мм и подплавлением матричного основного материала лопатки на глубину не более 150 мкм. Вариант управления структурообразованием металла шва в зависимости от частоты сканирования и положения фокального пятна пучка относительно поверхности шва приведен на рис. 12.

Рассмотрим конкретные примеры реализации новых технологических решений при изготовлении или сварке конструкций с использованием новых материалов, которые трудно поддаются сварке или считались несвариваемыми. Нами разработана технология сварки новых высокопрочных алюминиево-литиевых сплавов с гарантированным обес-

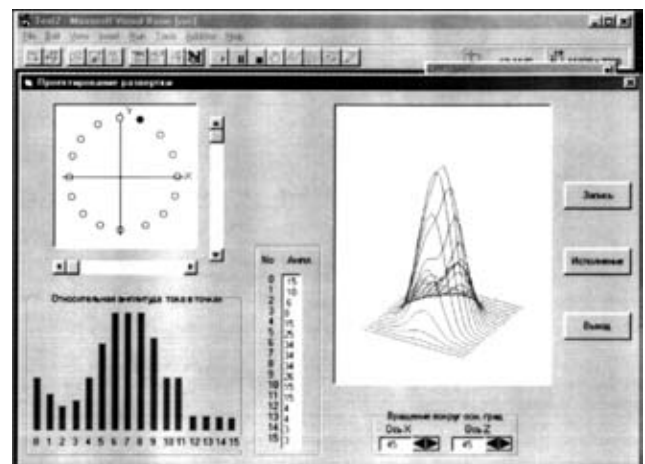


Рис. 10. Внешний вид экрана монитора с элементами набора программы управления дискретным сканированием пучка в соответствии с разработанным алгоритмом и визуализация объемного распределения плотности мощности в пятне нагрева в соответствии с заданными оператором параметрами процесса сканирования

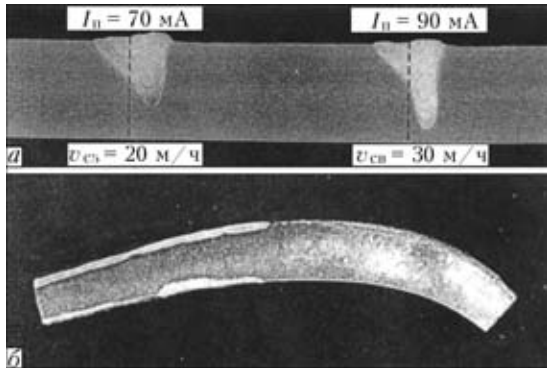


Рис. 11. Поперечные макрошлифы асимметричного проплавления сплава АМг6 (а) и модифицированной поверхности турбинной лопатки из сплава ЧС70 (б) [27, 28]

печением высоких механических свойств сварных соединений (таблица) и плотности металла шва.

Алюминиево-литиевые сплавы имеют более высокие прочностные характеристики по сравнению с широко используемыми сплавами АМг6 и 1201, способствуют снижению массы сварных конструкций на 15...20 % за счет более низкого удельного веса.

Принципиально по-новому решена проблема сварки для криогенной техники трубчатых переходников из разнородных материалов — нержавеющей стали с алюминиевыми сплавами. Сегодня для изготовления таких переходников часто используют способы сварки без расплавления кромок, а именно: сварку взрывом, металлургический прокат биметалла или диффузионную сварку. Все перечисленные способы имеют одно общее условие — обязательный контакт чистого алюминия со сталью. В этом виде соединение будет иметь прочностные свойства на уровне чистого алюминия, а из-за наличия в зоне перехода интерметаллидной прослойки его работоспособность в условиях теплосмен будет ограничена.

В ИЭС им. Е. О. Патона разработан способ сварки материалов, при котором исключен прямой контакт алюминия со сталью. С этой целью вначале на поверхность свариваемой нержавеющей трубы из паровой фазы в вакууме наносится тонкий слой 3...7 мкм элементов-модификаторов, таких, как никель, цирконий, ниобий и т. д. (рис. 13).

Определенный температурный режим обеспечивает надежное адгезионное сцепление напыленного слоя с материалом стали. Затем при сборке нержавеющей трубы с трубой из любого алюминиевого сплава осуществляется сварка стыка таким образом, чтобы проплавить алюминиевую трубу на всю толщину, а кромка со стороны стали чтобы была лишь подогрета и смочена жидким алюминием.

Реализация этого способа стала возможной лишь при использовании принципа программирования тепловложения в необходимом объеме на каждую из заготовок. Элементы-модификаторы на поверхности стальной трубы обеспечивают дополнительное легирование жидкого расплава алюминиевой ванны и соединение приобретает совершенно новые свойства. При испытании на разрыв временное сопротивление составило 320...350 МПа, что в 4...5 раз выше, чем при испытании соединений, имеющих

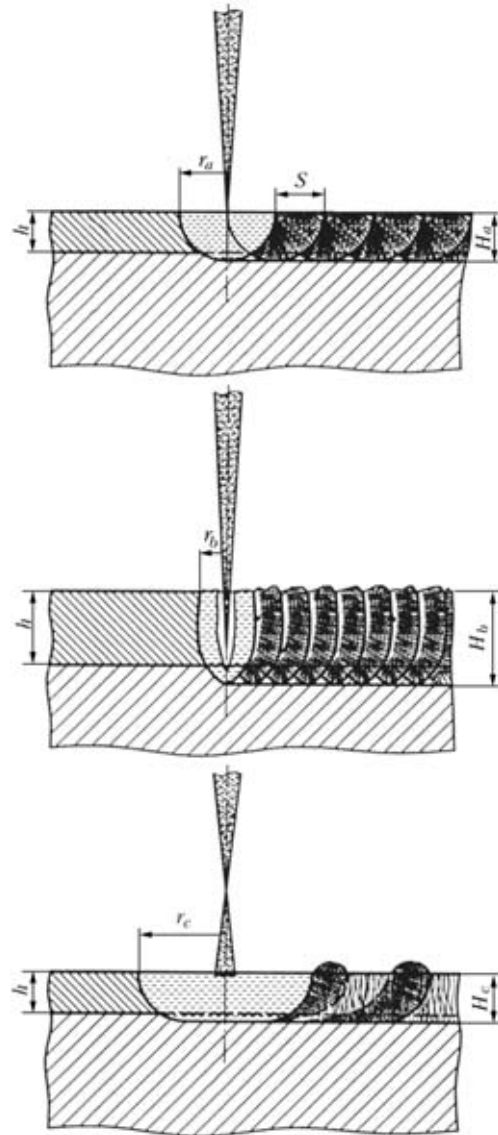


Рис. 12. Схематическое изображение формирования структуры поверхностного слоя при оплавлении предварительно нанесенной присадки в зависимости от изменения параметров дискретно сканирующего пучка [29]

прослойку интерметаллидов и чистого алюминия (рис. 14).

Разработана также технология ЭЛС композиционных материалов с алюминиевой матрицей и упрочненными частицами SiC или Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> без расплавления кромок. Сварка таких соединений осу-

**Прочностные свойства алюминиево-литиевых сплавов и их сварных соединений**

Марка сплава	Система легирования	Механические свойства основного металла			Временное сопротивление разрыву соединений, МПа	
		$\sigma_{0,2}$ МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	$\delta, \%$	АДС	ЭЛС
1420	Al-Mg-Li	470	292	11,8	352	402
1421	Al-Mg-Li-Sc	490	358	9,8	385	407
1430	Al-Mg-Li-Cu	460	350	10,0	330	355
1440	Al-Mg-Li-Cu	505	440	5,0	295	317
1460	Al-Cu-Li	580	425	11,0	290	305

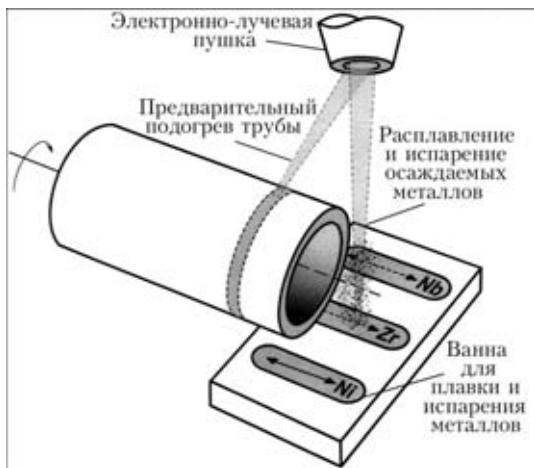


Рис. 13. Технологическая схема нанесения на поверхность нержавеющей трубы барьерного покрытия элементов-модификаторов из паровой фазы в вакууме перед ее сваркой с трубой из алюминиевого сплава

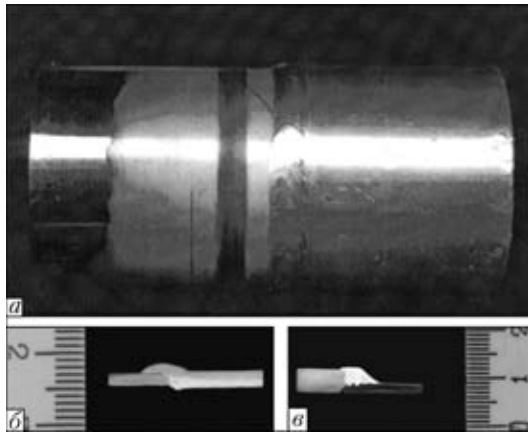


Рис. 14. Внешний вид трубчатого переходника нержавеющей сталь — алюминиевый сплав (а); макрошлифы соединений, выполненных ЭЛС с предварительным осаждением на кромку нержавеющей трубы элементов-модификаторов из паровой фазы (б, в), [30]

ществляется нанесением на соединяемые кромки диспергированного потока мелких капель присадочного материала. В качестве присадочного материала может быть использован как матричный материал композита, так и другой алюминиевый сплав. Расходуемый электрод присадочного материала при этом оплавляется электронным лучом и за счет его вращения с высокой скоростью мельчайшие капельки, попадая на кромки, формируют соединение без наличия каких-либо дефектов или границ раздела (рис. 15). Этот же процесс можно использовать и для получения металлических порошков сверхчистого состава без окисления поверхностного слоя, а также для получения сверхтонких чешуек. Для этого на пути диспергированного потока устанавливается охлаждаемая мишень, на которой и происходит сплющивание и кристаллизация капелек. Такие чешуйки имеют нанокристаллическое строение и могут быть использованы в производстве для прессования деталей с особыми свойствами и структурой.

В последние годы внедрена комбинированная технология изготовления анодных спусков для

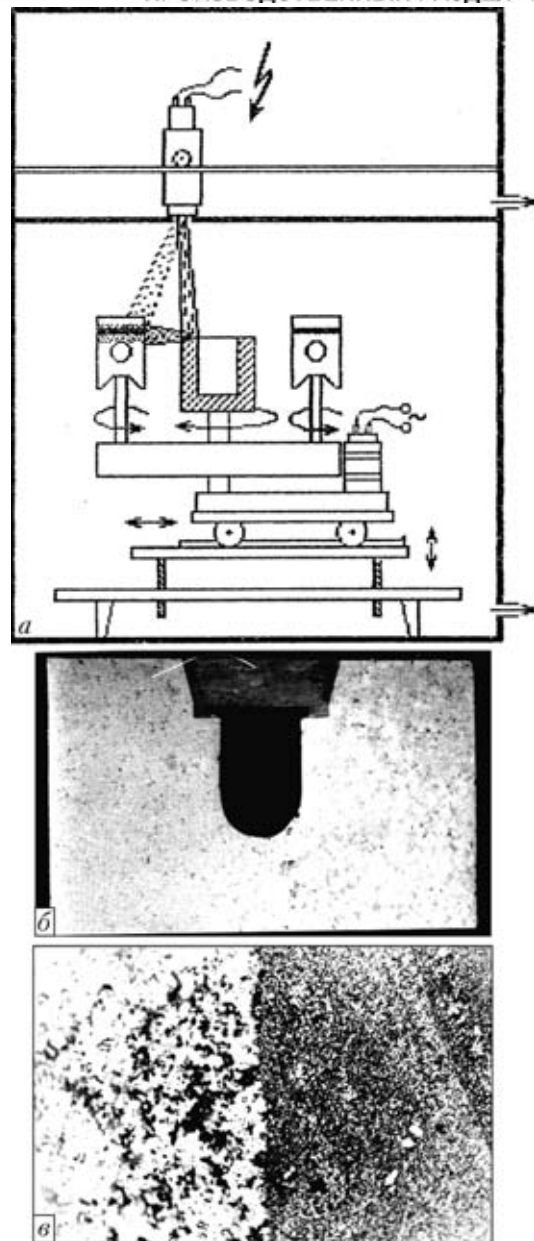


Рис. 15. Технологическая схема соединения путем нанесения способом диспергирования в вакууме расходуемого электрода электронным пучком (а); макрошлиф герметизации полости масляного охлаждения в головке поршня, изготовленного из композитного материала алюминиевый сплав + 18 % SiC (б); микроструктура границы перехода композит-диспергированная присадка (в), [31]

электролизеров по производству алюминия и аппаратных зажимов для энергетиков. В первом случае взрывной технологией изготавливаются плоские переходники алюминий-нержавеющая сталь, во втором по этой же технологии осуществляется одно- или двухсторонняя лакировка чистого алюминия медью. Затем электронным лучом первые переходники сваривают алюминиевый слой с алюминиевой ошиновкой, а нержавеющей слой сваривают со стальным кронштейном. Соединение стали с алюминием при этом не подвергается значительному разогреву и не происходит роста интерметаллидной прослойки на границе раздела. Конструкция выдерживает очень большие статические нагрузки (рис. 16). Те же преимущества

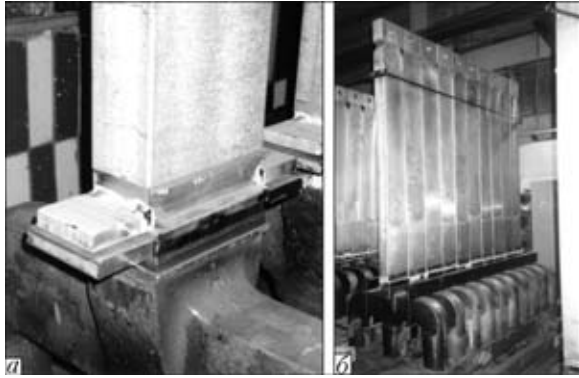


Рис. 16. Внешний вид подготовленного к ЭЛС стыка анододержателя с использованием переходника алюминиевой-нержавеющей стали, полученного по взрывной технологии, (а), и партия готовых анододержателей, подготовленных к отправке на металлургический комбинат, (б)

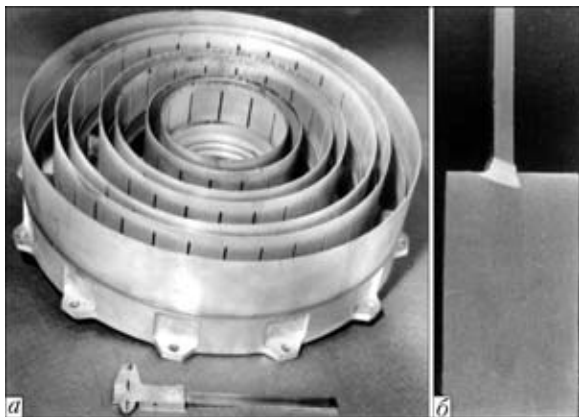


Рис. 17. Фрагмент системы СВЧ излучения, изготовленный из алюминиевого сплава и сваренный электронным лучом, (а); макрошлиф поперечного сечения приварки односторонним швом тонкостенной обечайки к фланцу большой толщины (б)

достигаются и при изготовлении концевых зажимов. Электрическое сопротивление после сварки электронным лучом не возрастает.

Сварка с программированием тепловложения успешно реализована при изготовлении элементов, генерирующих СВЧ излучение. В этой конструкции тонкостенные обечайки диаметром 150...500 мм и толщиной стенки 0,8 мм приварены к фланцу толщиной 20 мм и более. При этом формировалось одностороннее тавровое соединение с высокой плотностью металла шва, а деформация тонкостенных обечаек не превышала 0,03 мм на диаметр (рис. 17).

При ЭЛС конструкций с большой толщиной кромок или при их переменном сечении успешно реализована технология с микролегированием металла шва по всей глубине ванны элементами-модификаторами, такими, как скандий, цирконий и др. С этой целью до сварки в соединение укладывали присадку в виде тонкой фольги толщиной 100...200 мкм, полученной в условиях сверхбыстрой кристаллизации в вакууме (до  $10^7$  К/с) и имеющей в своем составе элементы-модификаторы в объеме, намного превышающем их взаимную растворимость в алюминии. Так, например, содержание скандия составляло 2...4, циркония 1,4...1,5 об. %. Это позволяет повысить плотность и, что более важно, увеличить прочностные характеристики соедине-

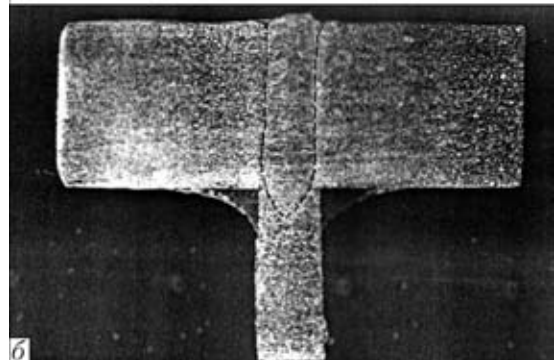
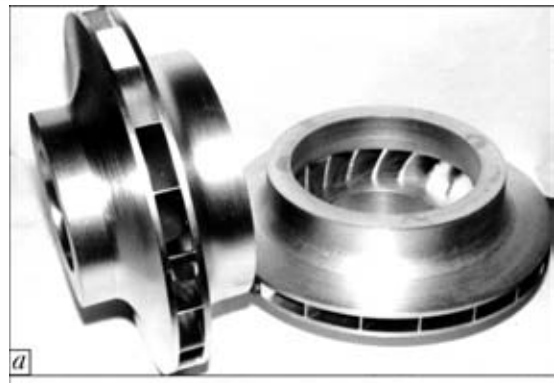


Рис. 18. Внешний вид сварных рабочих колес центробежного компрессора из высокопрочной нержавеющей стали (а); макрошлиф сварного соединения, полученного ЭЛС и пайкой в вакууме (б), [32, 33]

ний любых марок алюминиевых сплавов, повышает стойкость к образованию горячих трещин.

При промышленном изготовлении рабочих колес центробежных компрессоров газораспределительных станций из высокопрочных нержавеющей сталей ЭЛС прорезными швами приваривали покрывающий диск к цельнофрезерованным лопаткам основного диска. Затем участки с непроварами заполняли высокотемпературным припоем с наполнителем и подвергали колесо пайке в вакууме. Полученные по такой технологии соединения равнопрочны с основным металлом при испытании образцов на усталость и длительную прочность. Колеса диаметром 450...800 мм, изготовленные по комбинированной технологии, показаны на рис. 18.

В заключение можно отметить, что приведенные выше технологии относятся к разряду наукоемких, которые постоянно развиваются и совершенствуются. Специалисты института готовы сотрудничать в этом направлении с представителями промышленных и научных организаций любого профиля, независимо от форм собственности.

1. *Электронолучевая* сварка и последующая термомеханическая обработка обечаек большого диаметра из сплава 1201 // Б. Е. Патон, О. К. Назаренко, А. А. Бондарев и др. // Автомат. сварка. — 1983. — № 9. — С. 1-5.
2. *Bondarev A. A.* Electron beam welding of high-strength aluminum alloys // Paton Welding J., Pilot Issue. — 1999. — July. — P. 50-53.
3. *Особенности* электронолучевой сварки сплава 1201 // А. А. Бондарев, А. В. Лозовская, А. Я. Ищенко и др. // Автомат. сварка. — 1974. — № 5. — С. 44-47.
4. *Бондарев А. А., Третьяк Н. Г.* Свойства соединений листов и плит алюминиевого сплава 1201, сваренных электронным лучом // Там же. — 1980. — № 7. — С. 49-51.
5. *Бондарев А. А., Третьяк Н. Г.* Особенности сварки электронным лучом поволоков сплава 1201 толщиной до 250 мм и



- механические свойства соединений // Там же. — 1981. — № 4. — С. 1–5.
6. *Бондарев А. А.* Сопротивление усталости алюминиевых сплавов АМгб, АМгбН, 1201 и их соединений, выполненных электроннолучевой сваркой // Там же. — 1981. — № 6. — С. 40–42.
  7. *Исследование* механических свойств, структуры и деформаций соединений сплава 01420, выполненных электроннолучевой сваркой / А. А. Бондарев, Л. М. Лобанов, В. А. Пивторак и др. // Там же. — 1975. — № 3. — С. 14–17.
  8. *Бондарев А. А., Рабкин Д. М., Кузьменко О. С.* Свариваемость сплава АМгб электронным лучом в различных пространственных положениях // Там же. — 1976. — № 12. — С. 34–37.
  9. *Бондарев А. А., Скрябинский В. В.* Влияние параметров развертки электронного пучка на характеристики сварных соединений алюминиевых сплавов // Там же. — 1987. — № 12. — С. 57–62.
  10. *Бондарев А. А., Баранов В. В.* Автоматизация расшифровки рентгенограмм сварных швов // Там же. — 1988. — № 6. — С. 73–74.
  11. *Влияние* способов сварки плавлением высокопрочных алюминиевых сплавов на механические свойства и структуру сварных соединений / А. А. Бондарев, А. В. Лозовская, Андр. А. Бондарев и др. // Сб. тр. VII Междунар. конф. «Проблемы металлургии, металловедения и сварки». — Тбилиси: ИМЕТ, 2002. — С. 381–388.
  12. *Электроннолучевая* сварка плит большой толщины из сплава АМгб / Е. Г. Терновой, А. А. Бондарев, С. В. Пещерина и др. // Автомат. сварка. — 1991. — № 6. — С. 49–52.
  13. *Бондарев А. А., Кулаева А. Ф., Михайличенко М. Д.* Прогрессивные методы обработки деталей приборов // Автоматика и приборостроение. — 1965. — № 2. — С. 63–66.
  14. *Бондарев А. А., Воронай Н. М., Иванов Н. П.* Разработка технологии электронно-лучевой сварки корпусов изделий из сплава АМгб // Свароч. пр-во. — 1972. — № 3. — С. 18–20.
  15. *Бондарев А. А., Шевелев А. Д., Задерий Б. А.* Развитие технологии электроннолучевой сварки цветных и тугоплавких металлов и сплавов // Автомат. сварка. — 1991. — № 6. — С. 46–48.
  16. *Электроннолучевая* сварка обечаяк в локальном вакууме / А. А. Бондарев, А. И. Некрасов, М. И. Морейнис и др. // Там же. — 1984. — № 2. — С. 75.
  17. *Электроннолучевая* сварка крупногабаритных узлов из алюминиевых сплавов в камерах местного вакуумирования / Г. Л. Зубриенко, Ф. З. Тэненбаум, В. М. Петрованов и др. // Актуальные проблемы сварки цветных металлов. Докл. I Всесоюз. конф. — Киев: Наук. думка, 1980. — С. 476.
  18. *Бондарев А. А., Третьяк Н. Г., Зареченский А. В.* Электроннолучевая сварка алюминия АД0 применительно к изготовлению котлов железнодорожных цистерн // Тез. докл. III Всесоюз. конф. по сварке цветных металлов. — ТПИ, Тольятти, 1986. — С. 22.
  19. *Бондарев А. А., Терновой Е. Г., Шалай А. Н.* Совершенствование конструкционных сварнолитых поршней дизелей, свариваемых способом ЭЛС // Автомат. сварка. — 1988. — № 8. — С. 74–75.
  20. *Изготовление* сварных крупногабаритных тонкостенных панелей из высокопрочных алюминиевых сплавов / Б. Е. Патон, Л. М. Лобанов, В. И. Павловский, А. А. Бондарев // Там же. — 1989. — № 10. — С. 37–45.
  21. *Компьютерное* управление процессом электроннолучевой сварки с многокоординатными перемещениями пушки и изделя / Б. Е. Патон, О. К. Назаренко, В. М. Нестеренко и др. // Там же. — 2004. — № 5. — С. 3–7.
  22. *Bondarev A. A., Bondarev Andr. A., Lankin Yu. N.* Electron beam welding with a controllable heat and mass transfer // Current problems in welding and life of structures. — Intern. conf. — Kiev, 2003. — P. 188.
  23. *Ланкин Ю. Н., Бондарев А. А., Байштрук Е. Н.* Управление распределением плотности мощности электронного пучка по его сечению // Автомат. сварка. — 1985. — № 6. — С. 12–15.
  24. *Бондарев А. А., Скрябинский В. В.* Влияние параметров развертки электронного пучка на характеристики сварных соединений алюминиевых сплавов // Там же. — 1987. — № 12. — С. 57–62.
  25. *Бондарев А. А., Скрябинский В. В.* Сварка алюминиевых сплавов с программированием распределения плотности мощности электронного пучка по пятну нагрева // Автоматическое управление технологическим процессом электроннолучевой сварки. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона АН Украины, 1987. — С. 62–58.
  26. *Бондарев А. А., Бондарев Андр. А., Ланкин Ю. Н.* Электроннолучевая сварка с управляемым тепломассопереносом // Современные проблемы сварки и ресурса конструкций: Тез. докл. — Киев, 24–27 нояб. 2003.
  27. *Ланкин Ю. Н., Бондарев А. А., Бондарев Андр. А.* Компьютерное управление процессами в сварочной ванне при электроннолучевой сварке // Материалы междунар. науч.-техн. конф. «Инженерия поверхности и реновация изделий», Феодосия. — Киев: АТМ Украина, 2001. — С. 314.
  28. *Создание* защитно-восстанавливающих покрытий на жаропрочных высоконикелевых сплавах / М. Л. Жадкевич, А. А. Бондарев, В. И. Зеленин и др. // Там же. — С. 76–78.
  29. *Пат. Украины № 46073.* Спосіб формування покриття на поверхні виробів / Д. А. Дудко, А. А. Бондарев, В. І. Зеленин та ін. — Опубл. 15.05.2002, Бюл. № 5.
  30. *Бондарев А. А., Бондарев Андр. А.* Электроннолучевая сварка трубчатых переходников из разнородных материалов нержавеющей стали-алюминиевый сплав // Современные проблемы сварки и ресурса конструкций: Тез. докл. — Киев, 24–27 нояб. 2003. — С. 12.
  31. *Бондарев А. А., Бондарев Андр. А.* Некоторые закономерности центробежного распыления в вакууме и математическая модель процесса при электроннолучевом оплавлении быстровращающейся заготовки // Проблемы сварки, металлургии и смежных технологий. — Тбилиси: ИМЕТ, 1996. — С. 18–29.
  32. *Технология* производства сварнопаяных высоконагруженных рабочих колес центробежных компрессоров / К. А. Юценко, А. А. Бондарев, Т. М. Старущенко и др. // Сварные конструкции: Тез. докл. Междунар. конф. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины, 2000. — С. 170.
  33. *Особенности* формирования толстостенного таврового соединения с применением высокотемпературной пайки и сварки плавлением / В. Н. Радзиевский, Ю. Ф. Гарцунов, Г. Г. Ткаченко, А. А. Бондарев // Свароч. пр-во. — 2001. — № 4. — С. 42–46.

The paper describes a number of ingenious technological developments made by specialists of the E.O.Paton Electric Welding Institute during a period from 1969 till 2003. Advantages of the electron beam welding process are shown by an example of specific structural materials. Recommendations on design of a welding process under industrial enterprise conditions are given. Examples of new technological developments, including welding of high-strength aluminium alloys, alloyed with lithium and scandium, welding of dissimilar and composite materials, are described.

Поступила в редакцию 19.07.2004