



## ПЕРСПЕКТИВЫ ПРОИЗВОДСТВА СВАРНЫХ ТОЛСТОСТЕННЫХ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОРПУСОВ СОСУДОВ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ

Академик **Б. Е. ПАТОН** (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины),  
**А. Д. ЧЕПУРНОЙ**, д-р техн. наук (Мариупольский завод тяжелого машиностроения),  
**В. Я. САЕНКО**, **Л. Б. МЕДОВАР**, доктора техн. наук (Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Приведены основные этапы создания в нашей стране технологии производства сварных толстостенных биметаллических сосудов высокого давления, рассмотрены перспективы развития производства биметаллических сосудов на современном этапе.

*Ключевые слова:* биметаллические корпуса, сосуды высокого давления, штамповарные сосуды, биметаллические заготовки, биметаллические листы, реакторы для переработки нефтепродуктов, раскатные многослойные обечайки, барабаны паровых котлов, электрошлаковая сварка, плакирование при штамповке, плакирование взрывом

В середине XX столетия в процессе создания новой техники, прежде всего, атомной энергетики, военного судостроения, космонавтики, нефтехимической промышленности, перед наукой и производством были поставлены сложные задачи, связанные с необходимостью разработки эффективной технологии изготовления толстостенных биметаллических сосудов высокого давления, способных работать в условиях повышенных температур и давлений, периодических теплосмен, длительного воздействия сильноагрессивной среды, радиации и др.

Дело в том, что в большинстве случаев нет необходимости изготавливать толстостенный сосуд

или аппарат высокого давления целиком из нержавеющей высоколегированной стали или сплава. Достаточно защитить его внутреннюю поверхность от агрессивного воздействия рабочей среды сравнительно тонким (3...8 мм) коррозионностойким слоем из этой стали или сплава. Только в отдельных случаях, например при изготовлении трубных досок теплообменных химических аппаратов, нужно наносить защитный слой на внутреннюю и внешнюю поверхность. При этом интерес к биметаллическим сосудам обуславливается не только необходимостью экономии остродефицитных материалов. Применение биметалла с основным слоем из низко- или среднелегированной стали повышенной или высокой прочности позволяет существенно уменьшить толщину стенки сосуда. В результате масса такого биметаллического корпуса, а также трудоемкость его изготовления становятся

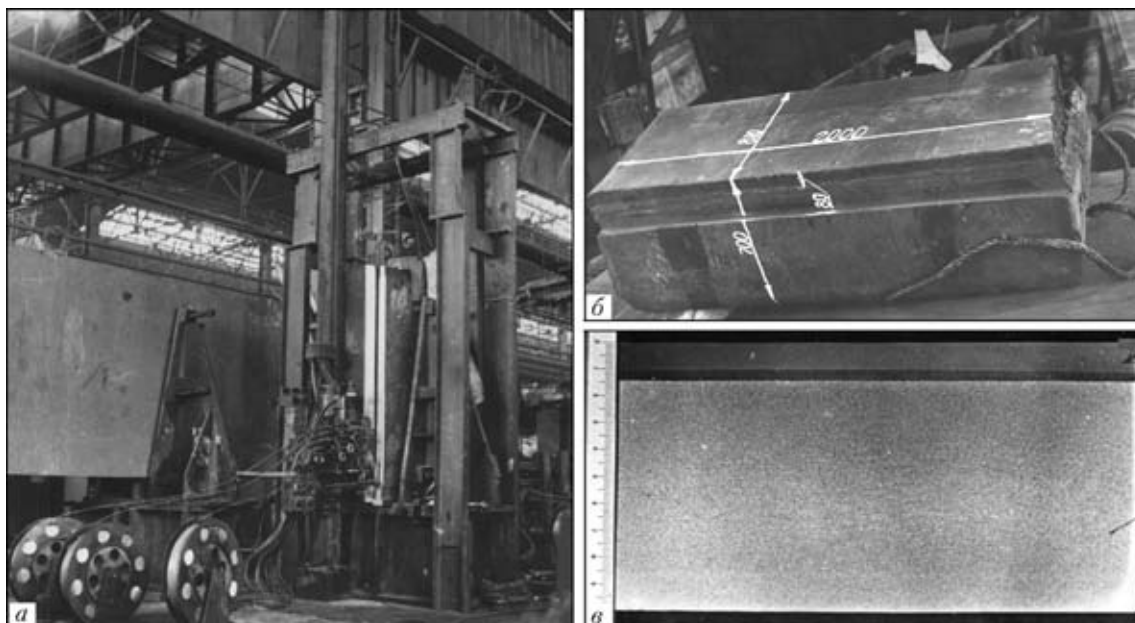


Рис. 1. Двухслойная заготовка, подготовленная к ЭШС с применением электродов (6 шт.) двумя аппаратами А-535 одновременно в общую сварочную ванну (а), двухслойная заготовка после ЭШС (б) и макрошлиф биметалла 09Г2ДТ + 1Х18Н10Т ( $\delta = 100$  мм), прокатанного из указанной двухслойной заготовки (в)



Рис. 2. Штамповарной шарообразный баллон ( $P_{\text{раб}} = 35$  МПа;  $T_{\text{раб}} = -70...100$  °С;  $d_{\text{нар}} = 1000$  мм) из биметалла 09Г2С + 0Х18Н10Т ( $\delta = 100$  мм)

намного меньше, чем однослойного, например выполенного целиком из нержавеющей стали 08Х18Н10Т.

Производство толстостенных биметаллических сосудов путемковки на прессе и последующей наплавки коррозионнстойкой стали на внутреннюю поверхность в начале 1960-х гг. являлось единственным способом получения, например, корпусов энергетических атомных реакторов. Вместе с тем, применяемый технологический процесс производства цельнокованных и ковочно-сварных биметаллических корпусов отличался низким коэффициентом использования материалов (в среднем 0,3), высокой трудоемкостью и длительностью цикла изготовления, что сдерживало выпуск указанных изделий.

Следует отметить, что еще в 1952 г. на Таганрогском заводе «Красный котельщик» (ТКЗ) в тесном содружестве с ИЭС им. Е. О. Патона впервые в мировой практике способом электрошлаковой сварки (ЭШС) изготовлены толстостенные барабаны паровых котлов тепловых электростанций из листового проката. Сначала освоили сварку только продольных швов, а затем и кольцевых. В 1954 г. производство штамповарных барабанов котлов с применением ЭШС было начато на Барнаульском котельном заводе (БКЗ). При освоении новой технологии производства барабанов котлов на ТКЗ обечайки из листовой стали марки 22К толщиной 90 мм вальцевали, а на БКЗ изготавливали из двух полуобечайек (корыт), которые штамповали на специальном прессе [1].

Для промышленной реализации штамповарного варианта изготовления толстостенных биметаллических корпусов требовались крупногабаритные биметаллические листы толщиной 80...300, шириной до 2500 и длиной до 6000 мм с гарантированной прочностью сцепления между плакирующим и основным слоями по всей площади листа,

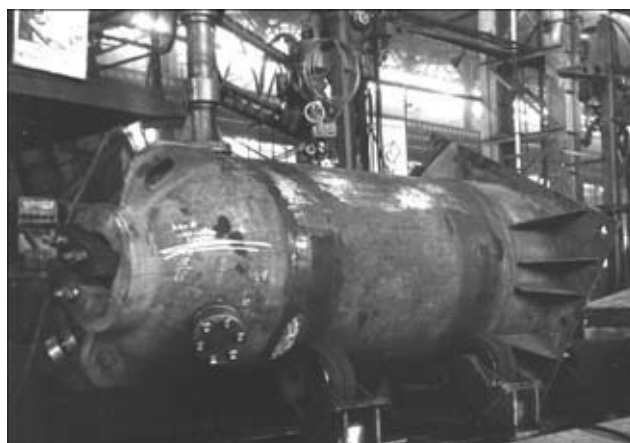


Рис. 3. Штамповарной цилиндрический сосуд ( $P_{\text{раб}} = 32$  МПа;  $T_{\text{раб}} = -40...100$  °С;  $d_{\text{нар}} = 1500$  мм) из биметалла 09Г2С + 0Х18Н10Т ( $\delta = 170$  мм)

которые наша промышленность в то время не производила.

В результате совместных экспериментов, проведенных в 1959–1960 гг. ИЭС им. Е. О. Патона Кузнецким металлургическим комбинатом и БКЗ, в опытно-промышленных условиях был предложен способ производства биметаллических листов на основе применения ЭШС [2]. Сущность этого способа заключалась в том, что плакирующая плита из нержавеющей высоколегированной стали или сплава приваривалась способом ЭШС к одной или двум широким плоскостям слитка или поковки из углеродистой, низко- или среднелегированной стали, а затем такая сварная заготовка нагревалась и прокатывалась на стане до получения двух-, трехслойного листа необходимых размеров (рис. 1).

В 1961 г. на Ждановском заводе тяжелого машиностроения — ЖЗМТ (в настоящее время — Мариупольский завод тяжелого машиностроения — МЗТМ), Металлургическом заводе им. Ильича и Коммунарском металлургическом заводе (ныне — Алчевский металлургический комбинат, АМК) совместно с ИЭС им. Е. О. Патона были продолжены работы по совершенствованию способа получения на основе ЭШС двух-, трехслойного листового проката. В результате на ЖЗМТ и Металлургическом заводе им. Ильича совместно с ИЭС им. Е. О. Патона было освоено производство листов из биметалла 09Г2С + 0Х18Н10Т толщиной 100...170 мм способом ЭШС. При этом биметаллические заготовки массой до 15 т сваривали на ЖЗМТ, а затем прокатывали на стане 4500 Металлургического завода им. Ильича [3, 4]. Важным преимуществом указанного способа является то, что антикоррозионные и другие свойства плакирующего слоя, определяемые химическим составом металла плакирующей плиты, могут быть заданы еще до изготовления биметаллической сварной заготовки. Кроме того, применение ЭШС для получения биметалла позволяет обеспечивать надежное сцепление слоев, не зависящее от степени обжатия при прокатке и достигаемое в результате проплавления свариваемых кромок при ЭШС.

В бывшем СССР первые толстостенные сосуды высокого давления в штамповарном исполнении



Рис. 4. Штамповварной корпус транспортного атомного энергетического реактора биметаллического проката 18X2МА + 00X18Н10Т в стенде после окончательной механической обработки

из биметалла были изготовлены в 1962 г. на ЖЗТМ в соответствии с технологическим процессом, разработанным совместно с ИЭС им. Е. О. Патона. Это были шарообразные баллоны [5] с толщиной стенки 100 мм и диаметром 1000 мм из биметалла 09Г2С + 0X18Н10Т, предназначенные для работы при давлении 35 МПа и температуре от  $-70$  до  $100$  °С (рис. 2). В 1963 г. на этом же заводе освоено производство цилиндрических баллонов [6] (с полусферическими днищами) из биметалла 09Г2С + 0X18Н10Т толщиной 170 и диаметром 1500 мм для работы при давлении 32 МПа и температуре от  $-40$  до  $100$  °С (рис. 3).

В 1967 г. на ЖЗТМ впервые в отечественной практике изготовлен штамповварной корпус транспортного атомного энергетического реактора ОК-350 из биметаллического проката 18X2МА + 00X18Н10Т (рис. 4). В создании биметаллического штамповварного корпуса ОК-350, кроме ИЭС им. Е. О. Патона, ЖЗТМ и Металлургического завода им. Ильича, принимали участие НИКИЭТ, ИАЭ им. И. В. Курчатова, ЦНИИ «Прометей» и другие организации.

Большая заслуга в создании новых способов и технологии получения на основе сварочных процессов и штамповварного варианта для производства толстостенных биметаллических сосудов вы-

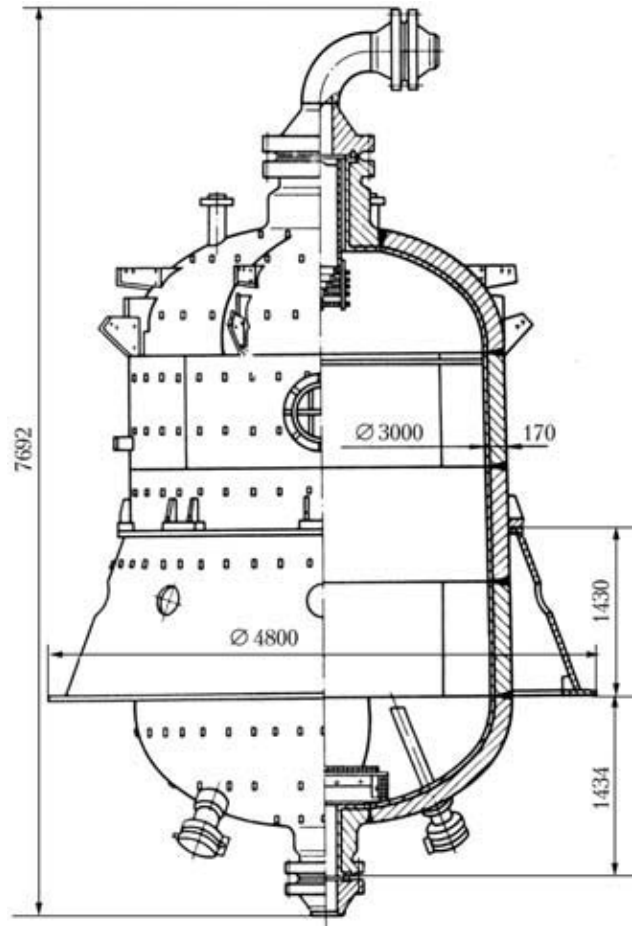


Рис. 5. Схема штамповварного реактора для реформинга ( $P_{\text{раб}} = 4,7$  МПа;  $T_{\text{раб}} = 525$  °С;  $d_{\text{вн}} = 3000$  мм) из биметалла 12ХМ + 08Х18Н10Т ( $\delta = 170$  мм). Масса аппарата в рабочем состоянии 83,7 т

сокого давления принадлежит академику НАН Украины Б. И. Медовару, под научным руководством и с непосредственным участием которого проводились эти работы в течение многих лет.

Способ производства толстостенового биметалла с применением ЭШС получил признание как у нас в стране, так и за рубежом. Из биметалла, полученного этим способом, был изготовлен ряд ответственных сосудов высокого давления. Вместе с тем широкое применение способа ЭШС при производстве биметалла на ЖЗТМ сдерживалось сравнительно высокой трудоемкостью и сложностью применяемой в то время технологической схемы ЭШС биметаллических заготовок толщиной 800...1000 и высотой до 2500 мм. С целью обеспечения равномерного и минимального проплавления свариваемых кромок ЭШС выполняли шестью электродами диаметром 3 мм двумя сварочными аппаратами А-535. При этом все шесть электродов через мундштуки подавали одновременно в общую сварочную ванну (по три с каждой стороны сварочного зазора) (см. рис. 1, а). В процессе сварки осуществлялось возвратно-поступательное перемещение мундштуков вдоль сварочного зазора по толщине стыка — от боковой кромки до середины и обратно для каждого аппарата А-535.

В конце 1960-х гг. производство толстостенового биметалла способом ЭШС для сосудов вы-

сокого давления было прекращено в связи с разработкой и освоением на указанных заводах новой технологии получения биметалла способом автовакуумной сварки давлением (АСД) путем прокатки несимметричных пакетов. Новая технология, по сравнению с применяемой ранее на основе ЭШС, характеризовалась более высокими технико-экономическими показателями [7–9].

Весьма эффективно применение толстостенных биметаллических сосудов высокого давления в нефтехимической промышленности. Производство штамповарных реакторов для гидроочистки и риформинга из полученного способом АСД биметалла с коррозионностойким слоем из стали 08X18H10T и основным слоем из теплоустойчивой стали марок 12XM, 20X2M и др. с 1965 г. было освоено на ПО «Ждановтяжмаш» [10], что позволило сократить сроки их изготовления, монтажа и ввода в эксплуатацию, а также повысить надежность и безопасность в работе. Следует отметить, что биметаллические реакторы для продуктов нефтепереработки, по сравнению с применяемыми однослойными реакторами с торкрет-бетонной внутренней футеровкой, не требуют обязательных периодических остановок в процессе эксплуатации для ремонта и замены футеровки.

Реакторы для риформинга и гидроочистки представляют собой вертикальные цилиндрические штамповарные сосуды высокого давления с полушарообразными или эллиптическими днищами. Биметаллические корпуса свободно устанавливаются на конические опоры, прикрепленные анкерными болтами к бетонным постаментам. Размеры их по диаметру доходят до 4000 мм, длина — до 16 м, масса — до 160 т, толщина стенки — до 150 мм.

Реакторы для риформинга (рис. 5) предназначены для проведения реакции риформинга нефтепродуктов в среде водородсодержащего газа в слое катализатора. Рабочее давление при реакции в зависимости от конструкции реактора и катализатора составляет 2,3...4,9 МПа, а температура — 480...540 °С. Реакторы для гидроочистки (рис. 6) предназначены для ведения процесса гидроочистки дизельных топлив в ходе взаимодействия водорода с олефинами, которые в слое алюмоплатинового катализатора переводятся в насыщенные углеводороды. Рабочее давление при реакции в зависимости от конструкции реактора составляет 2,6...6,0 МПа, а температура — 350...500 °С. При регенерации эти параметры равны соответственно 0,3...3,0 МПа и 480...550 °С. Разработку проектной технической документации на изготовление реакторов для продуктов нефтепереработки проводили с участием ВНИИНефтемаш, Ленгипро-нефтемаш и др.

В процессе разработки штамповарного варианта изготовления толстостенных биметаллических корпусов на ЖЗТМ потребовалось решение ряда технических вопросов по штамповке, сварке, термической и механической обработке отдельных узлов (обечаек, днищ, патрубков и др.) из биметалла и биметаллических сосудов в сборе. Многие технологические вопросы пришлось решать впервые

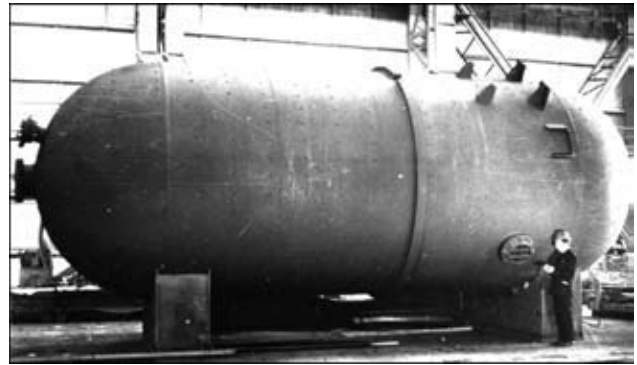


Рис. 6. Штамповарной реактор для гидроочистки ( $P_{\text{раб}} = 6,0$  МПа;  $T_{\text{раб}} = 425...500$  °С;  $d_{\text{вн}} = 3560$  мм) из биметалла 12XM + 08X18H10T ( $\delta_{\text{корн}} = 135$  мм;  $\delta_{\text{днищ}} = 80$  мм). Масса аппарата в рабочем состоянии 138,7 т

в отечественной практике. Для примера остановимся на одном из них.

Наибольшие трудности при производстве толстостенных полушарообразных днищ (не только биметаллических) возникают в том случае, если их невозможно получить цельноштампованными ввиду ограниченности штамповального пространства прессов или ограниченной мощности прессы. Обычно такие днища изготавливают сварными из предварительно отштампованных лепестков длиной  $1/3\pi R$  (где  $R$  — радиус шара) и сферического диска. Существенный недостаток указанного способа заключается в трудности получения днищ заданной геометрической формы из-за неравномерности усадки после штамповки, а также неравномерной деформации при сварке. Однако эти факторы трудно поддаются расчету и практически не могут быть учтены в процессе изготовления толстостенных днищ, что особенно касается днищ из толстостенового биметалла, у которых термическая усадка вследствие различия коэффициентов расширения слоев достигает значительных размеров.

Для облегчения получения заданной сферической формы был разработан способ изготовления сварных крупногабаритных толстостенных полушарообразных лепестковых днищ [11], который заключается в сборке симметричного шарового пояса, составленного из лепестков, по длине не менее  $2/3\pi R$ . После чего производят сварку лепестков шарового пояса, например способом ЭШС. Затем к шаровому поясу приваривают два сферических диска и производят термообработку шара. Полученный шар разрезают на два равных полушарообразных днища по экваториальной плоскости, перпендикулярной к оси симметрии, проходящей через центры сферических дисков. Существенным достоинством этого способа является возможность осуществления штамповки лепестков и сферического диска в одном штампе. При этом отпадает необходимость в специальном калибровочном штампе. Указанный способ [11] был успешно применен на ЖЗТМ при производстве крупногабаритных днищ биметаллических корпусов реакторов для продуктов нефтепереработки.

Одновременно с разработкой технологии производства штамповарных днищ и обечаек из толстостенового биметалла были решены вопросы

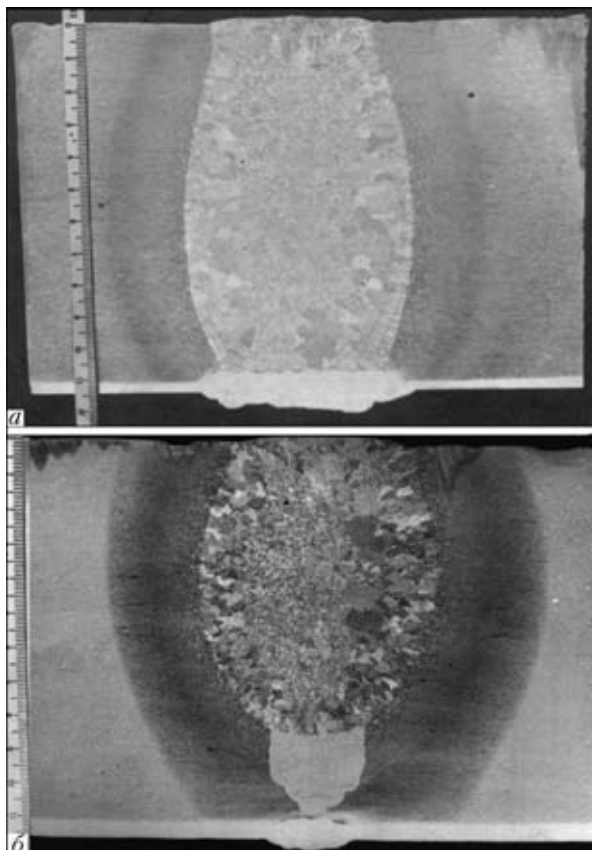


Рис. 7. Макроструктура продольного шва штампованного сосуда из биметалла 09Г2С + 0Х18Н10Т ( $\delta = 170$  мм) с полным удалением плакирующего слоя в зоне сварки (а) и с комбинированной разделкой кромок, предусматривающей предварительную подварку основного слоя (б). Масса аппарата в рабочем состоянии 138 т

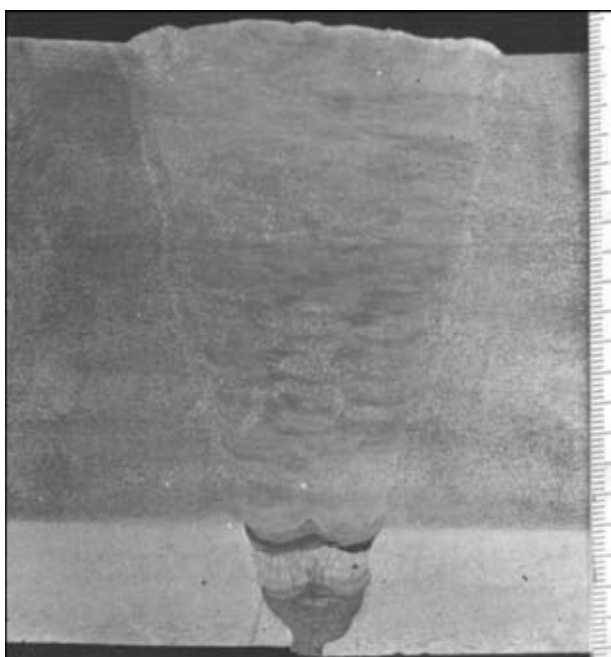


Рис. 8. Макроструктура кольцевого диаметального шва шарообразного баллона из биметалла 20Х2МА + 0Х18Н10Т ( $\delta = 120$  мм), выполненного автоматической сваркой при одностороннем доступе к свариваемым кромкам (только снаружи) со стороны основного металла

сварки сосудов. Применение ЭШС для сварки толстостенных биметаллических корпусов наиболее целесообразно.

Недостатком данного способа является обязательная нормализация изделия после сварки. При термообработке крупногабаритных сосудов такой высокотемпературный нагрев может привести к потере формы изделия. По этой причине нормализацию небольших сосудов или отдельных узлов (длиной до 4 м) по возможности проводят в вертикальном положении. Затем отдельные нормализованные после ЭШС узлы свариваются автоматической многослойной сваркой под флюсом с последующим отпуском готового изделия.

Следует отметить, что на БКЗ для штампованных герметизируемых сосудов после ЭШС применяли высокотемпературный нагрев с избыточным внутренним давлением. Для этого в сосуд перед нагревом под нормализацию загружали древесину, затем сосуд герметизировали. В результате сухой перегонки древесины при нагреве внутри сосуда создается достаточное давление, чтобы предотвратить его провисание и коробление [1].

Для ЭШС продольных и кольцевых швов биметаллического корпуса рекомендована разделка кромок (рис. 7, а) с полным удалением строжки плакирующего слоя (шириной 20... 40 мм на каждую кромку) по длине шва. Кроме того, для продольных швов была опробована комбинированная разделка кромок (рис. 7, б) с предварительной подваркой основного слоя внутри сосуда, которая легко обеспечивает требуемую геометрическую форму обечаек и значительно уменьшает объем наплавочных работ внутри корпуса. Такая технология внедрена при сварке цилиндрического сосуда с толщиной стенки 170 мм из двухслойной стали 09Г2С + 0Х18Н10Т.

Однако применительно к сварке корпусов из биметалла 18Х2МА + 0Х18Н10Т этот тип разделки оказался неприемлемым, поскольку при дуговой подварке основного слоя требуются предварительный подогрев, а также последующий отпуск, что усложняло технологический процесс.

Форма подготовки кромок с полным удалением плакирующего слоя в зоне сварки (рис. 7, а) является наиболее технологичной, поскольку позволяет получить равнопрочное сварное соединение без подплавления нелегированными швами аустенитной плакировки, предотвратив тем самым образование хрупких закалочных структур в зоне сплавления разнородных сталей. Сварку основного слоя выполняют по обычно принятой для основного металла технологии ЭШС, затем в местах выборки наплавку коррозионностойкого слоя в два или более проходов, например ленточным электродом автоматической сваркой под флюсом.

Разработан также вариант односторонней сварки диаметального шва, внедренный в 1963 г. при производстве на ЖЗТМ шарообразных биметаллических баллонов из стали 09Г2С + 0Х18Н10Т и 20Х2МА + 0Х18Н10Т толщиной 120 мм (рис. 8). Это связано с тем, что доступ внутрь шарообразного баллона из-за малого отверстия в горловине ока-

заялся невозможен. В таком случае корневой шов, расположенный в аустенитном плакирующем слое, выполняют механизированной сваркой в углекислом газе проволокой типа Х20Н9С2БТЮ, обеспечивающей высокую стойкость металла шва против межкристаллитной коррозии. Сварку корневого шва производят в вертикальном положении со сквозным проплавлением и обратным формированием на весу за счет сил поверхностного натяжения. Затем та часть, которая выполнена в плакирующем слое, заполняется аустенитными электродами, после чего на поверхность аустенитного наплавленного металла накладывают разделительный слой (два прохода) электродной проволокой из армо-железа. Поверх разделительного слоя многопроходную сварку под флюсом проводят по обычной технологии. Ферритный разделительный слой обеспечивает минимальное снижение пластических свойств наплавленного металла, легируемого хромом и никелем, в результате неизбежного проплавления аустенитного металла, а также предотвращает образование трещин в металле переходной зоны шва (рис. 8).

В результате проведения на ЖЗТМ большого комплекса экспериментальных исследований на натурных образцах и опытных изделиях был разработан оптимальный процесс изготовления биметаллических корпусов в штампованном исполнении, освоены на производстве технологии гибки, штамповки, сварки и термообработки, обеспечивающие получение требуемой геометрии корпуса (максимальная несоосность стыкуемых обечаек корпуса и днища составляет не более 2,5 мм).

Как известно, для изготовления весьма обширной группы сварных сосудов высокого давления технически наиболее целесообразно и экономически выгодно использовать низко- и среднелегированные стали повышенной или высокой прочности. Действительно, применение сталей с высокой прочностью, пластичностью и вязкостью позволяет не только существенно уменьшить габариты сварных изделий, снизить расход металла, но и способствует созданию новых конструктивных и технологических решений, реализация которых без использования подобных сталей была бы невозможной. Проведенные в середине 1960-х гг. с нашим участием комплексные опытно-исследовательские работы в целях повышения качества металла основного слоя биметаллических корпусов сосудов высокого давления показали, что толстолистовой прокат сталей 09Г2С, 16ГНМ, 18Х2М ( $\delta = 80...115$  мм) после электрошлакового переплава (ЭШП) характеризуется улучшенными (по сравнению с исходным мартеновским металлом) свойствами — в нем содержится значительно меньше серы, немагнитических включений, газов, отсутствует анизотропия пластических свойств, ударная вязкость поперечных образцов увеличивается на 40...80 %, а по толщине листа (по оси Z) — на 300...400 % по сравнению с исходным металлом. Порог хладноломкости образцов металла ЭШП, вырезанных по оси Z, смещается на 30° в сторону отрицательных температур для нормализованного металла и на 50° для закаленного металла. Сварные соединения

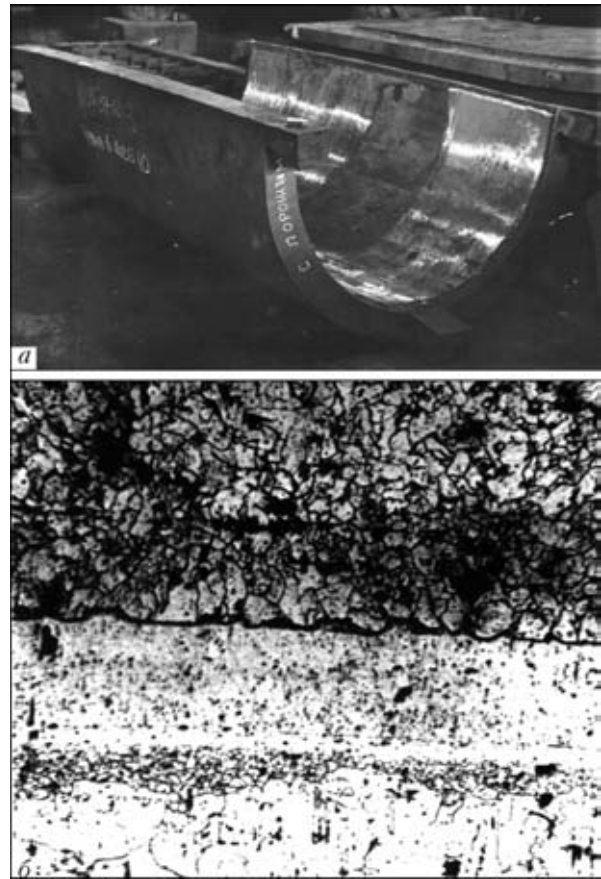


Рис. 9. Внешний вид (а) биметаллической полуобечайки ( $d_{нар} = 1800$  мм;  $\delta = 120$  мм), полученной в процессе горячей штамповки с применением прослойки Ni-Mn и микроструктура ( $\times 100$ ) зоны соединения слоев в биметалле 18Х2МА + 0Х18Н10Т после штамповки (б)

стали 09Г2С после ЭШС можно подвергать лишь высокому отпуску, который обеспечивает требуемую ударную вязкость в металле ЗТВ [12].

Как показали исследования [13], весьма перспективным при производстве биметаллических корпусов сосудов высокого давления из толстолистовой низко- и среднелегированной стали ЭШП может оказаться применение электронно-лучевой сварки (ЭЛС), для реализации которой нормализация не обязательна. Так, при ЭЛС стали 18Х2МАШ толщиной 80 мм для получения практически равнопрочного соединения с высоким уровнем ударной вязкости металла шва и ЗТВ при  $-70$  °С достаточен только отпуск после сварки. Кроме того, при ЭЛС биметаллических корпусов ширина дорожки удаляемого перед сваркой плакирующего слоя не превышает 5 мм на сторону, что дает возможность существенно уменьшить объем наплавочных работ внутри сосуда после ЭЛС основного слоя.

На ЖЗТМ в процессе освоения промышленного производства биметаллических штампованных сосудов одновременно проводили поисковые работы по созданию принципиально новых, более дешевых и эффективных способов их изготовления, не требующих для своей реализации биметаллического проката. Остановимся на некоторых из этих разработок, которые по разным причинам не были доведены

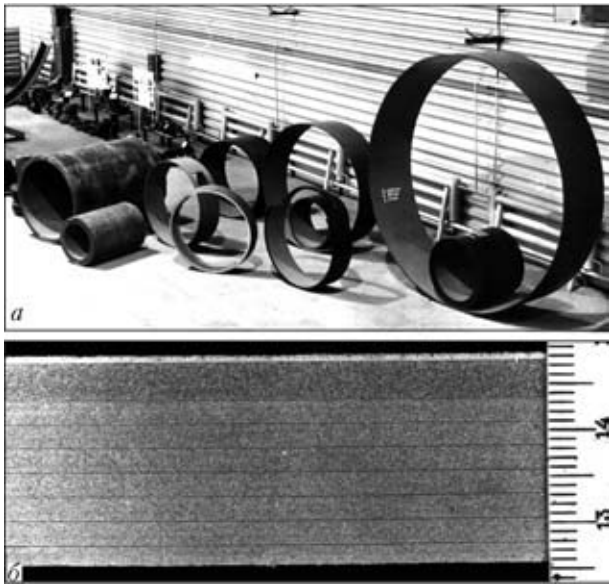


Рис. 10. Внешний вид кольцевых КСМ обечаек (более тонкие и большего диаметра), полученных способом горячей раскатки на кольцераскатном стане, МС заготовок (более толстые и меньшего диаметра), изготовленных путем канонической навивки рулонной ленты из стали 09Г2СФ (а), макроструктура металла КСМ обечаек с коррозионностойким внутренним слоем (б)

до промышленного внедрения, но и сегодня через много лет еще не утратили своего значения.

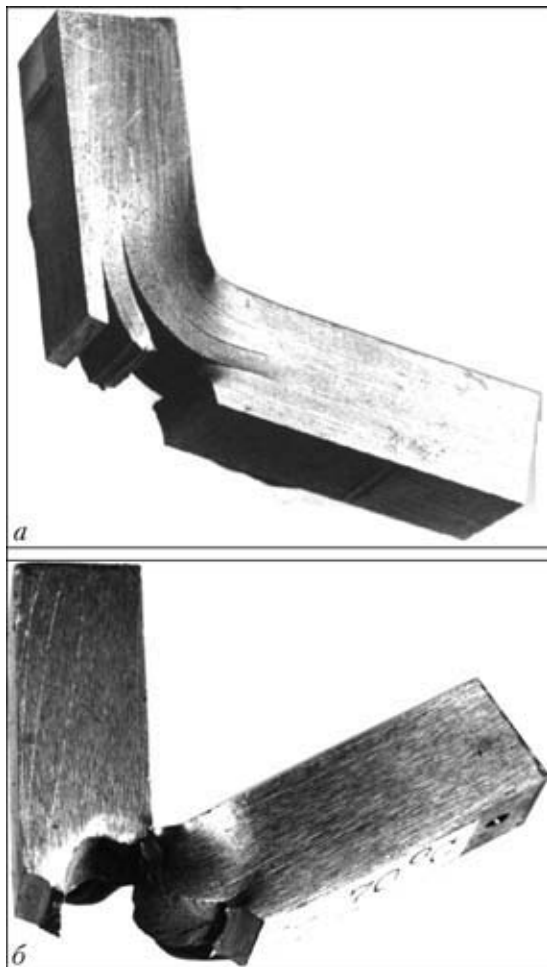


Рис. 11. Характер разрушения образцов Шарпи при ударном изгибе из стали 09Г2СФ КСМ (а) и 09Г2СФ (б)

В предложенном способе [14] процесс плакирования поверхности заготовки (изделия) совмещают в одной технологической операции с процессом ее горячей штамповки, т. е. две операции, а именно: образование прочного сцепления между слоями и изготовление требуемой заготовки или изделия из биметалла объединяют в одну операцию. На рис. 9, а приведен внешний вид биметаллической (18Х2МА + 08Х18Н10Т) полуобечайки толщиной 120 мм, диаметром 1800 мм, изготовленной в производственных условиях ЖЗТМ непосредственно в процессе горячей штамповки с применением разработанного в ИЭС им. Е. О. Патона [9] способа прессовой сваркопайки (ПСР). При нагреве под штамповку ( $T_{шт} = 1150...1170\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) порошок марганценикелевого сплава (60Mn-40Ni) с  $T_{пл} = 1018\text{ }^{\circ}\text{C}$ , помещенный в зазор между основным и плакирующими слоями двухслойной заготовки, герметизированной по периметру сваркой, расплавляется, растворяя поверхностные оксидные пленки и обеспечивая надежный контакт между соединяемыми плоскостями. В процессе штамповки происходит выдавливание прослойки на периферию в специальные копильники и толщина ее в готовой биметаллической заготовке не превышает 0,25 мм, что обеспечивает гарантированное сцепление между слоями ( $\sigma_{среза} > 300\text{ МПа}$ ). Макро- и микроисследования зоны сплавления в биметалле показали его высокое качество по всей поверхности плакирования (рис. 9, б).

В начале 1980-х гг. в ИЭС им. Е. О. Патона была предложена принципиально новая технология получения цилиндрических заготовок для сосудов высокого давления из раскатных многослойных заготовок [15]. Сущность этой технологической схемы состоит в том, что многослойную (МС) заготовку, полученную путем канонической навивки под прямым углом рулонной ленты толщиной 3...6 мм, нагревают в печи, а затем осуществляют раскатку такой МС заготовки на кольцераскатном стане до получения сцепления между слоями на основе АСД. В связи с тем, что диаметр МС заготовки в процессе горячей деформации увеличивается, для раскатки берут МС заготовки с диаметром меньшим, чем требуемый конечный диаметр цилиндрической обечайки, и большей суммарной толщиной.

Использование рулонной стали, не требующей специальной подготовки поверхности перед намоткой МС заготовки, а также совмещение процессов соединения слоев и формирования обечайки заданных размеров позволяют получать сравнительно дешевые бесшовные кольцевые заготовки. Опытно-промышленные испытания [16, 17] показали, что специальная конструкция МС заготовки и оптимальная технология ее раскатки обеспечивают надежное сцепление между слоями и получение монолитного металлического материала с особой макроструктурой, названного квазислоистым металлическим материалом (КСМ) (рис. 10). Основная особенность КСМ состоит в организованном слоистом внутреннем строении. Такой материал характеризуется свойствами многослойных металлических материалов при динамических нагрузках

и низких температурах, а также обычных монолитных металлических материалов при статической нагрузке. При испытаниях на ударный изгиб, если надрез нанесен на поверхность КСМ, металл образца не удается разрушить (рис. 11). Сопротивление материала распространению трещины обеспечивается расщеплением металла КСМ на ряд слоев у ее вершины. Достоинством технологии горячей раскатки КСМ обечаек является возможность получения квазислоистой структуры с коррозионностойким плакирующим слоем (внутренним или наружным или одновременно и с тем, и с другим).

Металл КСМ поддается всем видам и способам сварки, как и обычный монолитный металл. На основе горячей раскатки МС заготовок можно получить различные кольцевые заготовки сосудов высокого давления, труб для энергетических установок, в том числе биметаллических с коррозионностойким внутренним слоем, а также для других изделий ответственного назначения, материал которых должен отличаться высокой стойкостью против хрупких разрушений, особенно при отрицательной температуре. Однако для организации промышленного производства таких обечаек требуется создание станов для раскатки заготовок высотой 2000 мм и более, поскольку существующие позволяют раскатывать обечайки высотой до 750 мм [18].

В этой связи заслуживает внимания работа [19], в которой предлагается технология раскатки кольцевых заготовок для производства оборудования АЭС. С использованием раскатного стана (радиального или вертикального типа) изготавливают крупногабаритные заготовки реакторов высокой точности (с минимальными припусками) диаметром до 8 м и высотой до 4 м, что позволяет резко (почти на 30 %) сократить расход металла. Наряду с этим уменьшается на 20...25 % трудоемкостьковки и в 1,5...2 раза механической обработки, снижается расход режущего инструмента, сокращается цикл изготовления крупногабаритных кольцевых изделий, частично высвобождаются производственные мощности сталеплавильного, кузнечно-прессового и механообрабатывающего производства. Одновременно, как показано в статье [17], в процессе горячей раскатки кольцевых заготовок на раскатном стане решается проблема получения биметаллических обечаек.

Полученные результаты дают основание для проведения комплекса работ по созданию раскатного оборудования и промышленной технологии производства различных кольцевых заготовок сосудов высокого давления, корпусов атомных реакторов, биметаллических труб для энергетических установок и других изделий ответственного назначения, материал которых должен иметь улучшенные характеристики вязкости и сопротивления хрупкому разрушению в условиях работы при низких температурах, а также воздействия агрессивной коррозионной среды и нейтронного облучения.

Проблема плакирования внутренней поверхности толстостенных сосудов, в том числе изготавливаемых из раскатных обечаек, также может быть

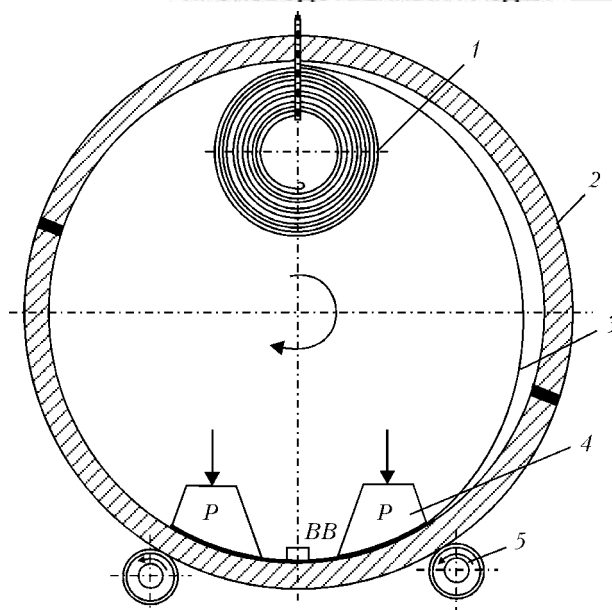


Рис. 12. Принципиальная схема плакирования внутренней поверхности цилиндрических сосудов с использованием сварки взрывом: 1 — рулон, свернутый из полотна плакирующего металла; 2 — корпус сосуда; 3 — полотно плакирующего металла; 4 — прижимы; 5 — роликовый стэнд

решена путем использования сварки взрывом. Согласно разработанному на ЖЗТМ совместно с ИЭС им. Е. О. Патона способу [20], плакирующий материал, например коррозионностойкая сталь марки 12Х18Н10Т в виде полотна (ленты) толщиной 0,5...1,5 мм, предварительно свернутого в рулон, помещают внутрь сосуда и закрепляют в обойме (рис. 12). Сосуд с целью вращения устанавливают на роликовом стэнде. Рулон постепенно разворачивают и в нижнем положении накладывают на внутреннюю поверхность сосуда, в двух местах по всей длине сосуда закрепляют прижимами. Между прижимами по всей длине сосуда располагают линейный заряд взрывчатого вещества (ВВ), который инициируют. Таким образом, происходит локальная сварка взрывом. Затем прижимы убирают и на роликовом стэнде поворачивают на шаг, равный 50...200 мм. При этом постепенно разматывают рулон и повторяют указанные выше операции. Периодически, в момент остановки вращения, производят локальную сварку взрывом первого плакирующего слоя с поверхностью сосуда, а также всех последующих слоев в шахматном порядке. Количество слоев, а также общая толщина плакирующего слоя определяют условиями работы сосуда.

При замыкании каждого плакирующего слоя, равного по длине соответствующей окружности, наносят герметизирующий шов по всей длине образующей сосуда, который предотвращает возможное проникновение агрессивной среды в зазор между плакирующими слоями в случае повреждения одного из верхних слоев. Плакирующий слой можно получить за счет как спиральной укладки витков, так и концентрических витков металлического полотна.

Благодаря многослойной конструкции плакирующего слоя и применению локальной сварки





взрывом облицовочной ленты с корпусом и отдельных слоев друг с другом обеспечиваются условия для компенсации температурных напряжений в зоне соединения разнородных материалов, возникающих обычно из-за разности коэффициентов линейного расширения металла основного и плакирующего слоев биметаллического корпуса. Вместе с тем при реализации указанного способа плакирования в производстве биметаллических сосудов необходимо разработать надежную систему контроля, которая сигнализировала бы о нарушении герметичности межслойного пространства (как на стадии изготовления изделия, так и в процессе его эксплуатации) из-за возможного разрушения герметизирующих сварных соединений или повреждения одного из плакирующих слоев.

В середине 1990-х гг. появились многочисленные публикации [21–24], посвященные различным аспектам применения и получения толстостенового биметалла способами, основанными на применении электрошлаковой наплавки (ЭШН) плакирующего слоя из коррозионностойкой стали на основу из конструкционной стали. В этих работах отмечается, что при производстве коррозионностойких биметаллических заготовок способом ЭШН обеспечивается наиболее высокая по сравнению с другими способами получения биметалла (пакетным способом или сваркой взрывом) прочность соединения плакирующего и основного слоев. Так, сопротивление срезу, определяемое в месте контакта слоев, составляет 400...450 МПа, что соизмеримо с пределом текучести основного слоя [23]. Сообщается о разработке технологии вертикальной ЭШН биметаллических заготовок прямоугольного и квадратного сечения на действующих печах ЭШП, которые, по данным работы [24], используются для этой цели практически без переделки основных элементов и узлов. При этом отмечается, что производство биметаллических заготовок массой до 15 т на специально созданных для ЭШН установках наклонного типа оказалось весьма трудо- и энергоемким из-за наличия трех расходоуемых составных электродов и подвижного кристаллизатора, для которого требуются специальные шлаки и датчики передвижения.

Кроме того, по мнению авторов [24], непараллельное взаимное расположение расходоуемых электродов и сляба основного слоя не позволяет получить одинаковую глубину проплавления в зонах под и между электродами, поскольку на распределение тепла оказывает действие капельный перенос металла в шлаке.

Следует отметить, что характерной особенностью однопроходной ЭШН как при наклонном, так и вертикальном расположении наплавляемой заготовки является использование для двух различных технологических процессов (расплавления электродного металла и проплавления основного металла) единого источника тепла, т. е. между ними существует жесткая связь. Это создает определенные сложности в обеспечении минимального и равномерного проплавления основного слоя при ЭШН, что необходимо для получения нап-

лавленного металла стабильного химического состава по всей площади.

Новые возможности для производства биметаллических заготовок для сварных корпусов высокого давления открываются благодаря применению нового ЭШН с использованием жидкого присадочного металла (ЭШН ЖПМ) [25–27]. Исследования показали, что применение процесса ЭШН ЖПМ в сравнении с каноническим процессом ЭШН позволяет наплавлять плакирующий слой с минимальной глубиной проплавления основного слоя как по сечению, так и по высоте заготовки. При необходимости наплавка может производиться и по схеме сваркопайки, т. е. практически без проплавления основного слоя [25, 26]. В результате удается обеспечить более высокое качество в таком биметалле по сравнению с биметаллом, изготавливаемым другими способами. Важным является также тот факт, что при ЭШН ЖПМ не требуется применения расходоуемых электродов, изготовление которых, особенно из высоколегированных сталей и сплавов, составляет существенную статью расходов при промышленной реализации ЭШН.

К сожалению, в последние годы МЗТМ не производит биметаллические штамповарные сосуды высокого давления из-за отсутствия заказов на них.

Вместе с тем, несмотря на объективные трудности МЗТМ все же сумел сохранить основное оборудование, кадровый и производственно-технический потенциал. Это вселяет уверенность, что при условии определенных финансовых вложений и наличия заказов производство толстостенных биметаллических сосудов высокого давления может быть не только восстановлено в прежнем объеме, но и расширено с учетом того нового, передового, что появилось в мире за последние годы в области металлургии, обработки давлением и сварки. Кроме того, производственно-техническая база МЗТМ позволяет в короткие сроки освоить производство однослойных корпусов высокого давления таких, например, как толстостенные барабаны паровых котлов в комплекте с другим оборудованием, которые в Украине до настоящего времени серийно не изготавливались.

1. *Электрошлаковая сварка* / Под ред. Б. Е. Патона. 2-е изд. доп. — М., Киев: Машгиз, 1959. — 410 с.
2. А. с. 129473 СССР. Способ получения многослойного проката / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, А. М. Макара и др. — Заявл. 09.11.59. Оpubл. 03.04.60; Бюл. № 12.
3. Патон Б. Е., Медовар Б. И., Луцок-Худин В. А. Производство двухслойных листов с применением электрошлаковой сварки // Бюл. ЦНИИЧМ. — 1962. — С. 15–21.
4. *Производство толстостенных сварных сосудов из двухслойной стали с коррозионностойкой аустенитной облицовкой* / Б. И. Медовар, В. А. Луцок-Худин, В. Я. Саенко и др. // Производство, сварка и применение двухслойной стали. — М.: ГОСИНТИ, 1963. — С. 17–28.
5. *Автоматическая сварка кольцевых швов сосудов из двухслойной стали* / И. И. Кумыш, В. А. Луцок-Худин, В. Я. Саенко, Д. П. Антоненко // Свароч. пр-во. — 1964. — № 2. — С. 8–10.
6. Луцок-Худин В. А., Кумыш И. И., Саенко В. Я. Механизированная сварка толстостенных сосудов из двухслойной стали // Хим. и нефт. машиностроение. — 1967. — № 6. — С. 14–19.
7. *Новая технология изготовления толстостенных биметаллических сосудов высокого давления* / В. А. Луцок-Худин, В. Я. Саенко, И. И. Кумыш и др. — М.: НИИформтяжмаш, 1968. — С. 29–33.

8. *Электрошлаковая* технология в машиностроении / Б. И. Медовар, В. Я. Саенко, И. Д. Нагаевский, А. Д. Чепурной / Под общ. ред. Б. Е. Патона. — Киев: Техніка, 1984. — 215 с.
9. *Многослойная* сталь в сварных конструкциях / Под ред. Б. Е. Патона, Б. И. Медовара. — Киев: Наук. думка, 1984. — 288 с.
10. *Реакторы* для переработки нефтепродуктов. Каталог-справочник / С. И. Амельчаков, Л. Е. Бурая, М. Ф. Матяш и др. — Киев: Реклама, 1980. — 56 с.
11. А. с. 339088 СССР, МПК. Способ изготовления крупногабаритных полушаровых днищ / В. Ф. Карпов, А. Ф. Довженко, В. Г. Кононов и др. — Заявл. 08.09.70. Опубл. 09.10.71; Бюл. № 12.
12. *О целесообразности* изготовления ответственных сварных конструкций из толстолистового металла, улучшенного методом ЭШП / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, В. Я. Саенко и др. // Рафинирующие переплавы. — Киев: Наук. думка, 1974. — С. 128–138.
13. *Медовар Б. И., Саенко В. Я.* Вопросы сварки низко- и среднелегированной толстолистовой электрошлаковой стали // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1981. — Вып. 14. — С. 20–24.
14. А. с. 218640 СССР, МПК. Способ изготовления биметаллических штампованных изделий / В. А. Луцок-Худин, В. Я. Саенко, Г. Г. Андрианов и др. — Заявл. 24.02.67. Опубл. 17.05.68; Бюл. № 17.
15. *Новая* технология производства сосудов высокого давления из раскатных многослойных обечасок / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, В. Я. Саенко и др. // Всесоюз. конф. по многослойным сварным конструкциям и трубам.: Тез. докл. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона АН УССР, 1980. — 64 с.
16. *Новый* подход к получению и разработке многослойных материалов из низко- и среднелегированных сталей / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, В. Я. Саенко и др. // Пробл. спец. электрометаллургии. — 1981. — Вып. 15. — С. 3–7.
17. *Бесшовные* квазислоистые трубы, полученные горячей раскаткой многослойных заготовок / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, В. Я. Саенко и др. // Там же. — 1984. — № 21. — С. 29–34.
18. *Горячая* раскатка стальных колец и обечасок / Под ред. Б. Е. Патона, Б. И. Медовара. — Киев: Наук. думка, 1993. — 240 с.
19. *Внедрение* технологии раскатки кольцевых заготовок для производства оборудования АЭС / С. А. Елецкий, В. А. Решетников, В. Б. Телеш, Э. З. Сайфулин // Кузн.-штамп. пр-во. — 1987. — № 10. — С. 16–17.
20. А. с. 607707 СССР, МПК. Способ плакирования внутренней поверхности цилиндрических сосудов / И. Д. Нагаевский, В. А. Александров, В. Я. Саенко и др. — Заявл. 07.12.76. Опубл. 09.10.78; Бюл. № 18.
21. *Разработка* технологии электрошлаковой наплавки в производстве биметаллических листов / А. В. Попов, В. И. Шейко, Е. Д. Кудинов и др. // Тяж. машиностроение. — 1994. — № 1. — С. 29–30.
22. *Производство* биметаллического проката методом электрошлаковой наплавки / В. А. Тишков, И. Г. Родионова, В. И. Пузачев и др. // Металлургия. — 1995. — № 8. — С. 30–31.
23. *Производство* заготовок для коррозионно-стойкого биметалла на электрошлаковых печах методом наплавки / А. А. Шарапов, И. Г. Родионова, А. Г. Шалимов и др. // Труды Третьего конгресса сталеплавильщиков. — М., 1996. — С. 192–194.
24. *Опыт* разработки технологии производства коррозионно-стойких биметаллических заготовок с использованием электрошлакового переплава / А. А. Шарапов, И. Г. Родионова, В. И. Пузачев и др. // Сталь. — 1996. — № 12. — С. 27–29.
25. *Medovar B. I., Saenko V. Ja., Medovar L. B.* Electroslag processes used in production of clad steel // The Paton Welding J. — 1999. — Pilot issue July. — P. 71–75.
26. *Медовар Б. И., Саенко В. Я., Медовар Л. Б.* Получение заготовок коррозионно-стойкого биметалла методом электрошлаковой наплавки // Пробл. спец. электрометаллургии. — 2000. — № 2. — С. 3–11.
27. *Патон Б. Е., Л. Б. Медовар, В. Я. Саенко.* Новые возможности электрошлаковых технологий в машиностроении // Металлургия машиностроения. — 2003. — № 1. — С. 2–5.

The paper describes the main stages of development in our country of the technology of manufacturing thick-walled bimetal welded high pressure vessels, and considers the prospects for development of bimetal vessel manufacture at the current stage.

Поступила в редакцию 18.11.2003