



УДК 669.187.2

# БИМЕТАЛЛИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ И ИЗДЕЛИЯ, ИЗГОТОВЛЯЕМЫЕ СПОСОБОМ ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНОЙ НЕКАПИЛЛЯРНОЙ ПАЙКИ

Г. М. Григоренко, Л. Г. Пузрин,  
М. А. Полещук, А. Л. Пузрин

Впервые дано четкое определение способа некапиллярной пайки. Некапиллярные способы пайки позволяют получать равнопрочные соединения и не ограничивают размеров соединяемых деталей. Приведены примеры разработанных в Институте электросварки им. Е. О. Патона и успешно применяемых в производстве технологических процессов и оборудования для высокотемпературной некапиллярной пайки ответственных биметаллических изделий.

For the first time a clear definition of method of non-capillary brazing was given. The non-capillary methods of brazing allow producing full strength joints and do not limit the sizes of parts being joined. Examples of technological processes and equipment for high-temperature non-capillary brazing of critical bimetal products, developed at the E.O.Paton Electric Welding Institute and used successfully in industry, are given.

**Ключевые слова:** биметаллические изделия; способы капиллярной, некапиллярной пайки; капиллярная сила; растворение оксидов; внутреннее окисление

Биметаллические изделия и материалы изготавливают путем соединения разнородных металлов с помощью многочисленных способов горячей прокатки, прессования, наплавки, сварки, лужения, напыления, химического, гальванического покрытия и пр. Это позволяет получать необходимые свойства изделий, которых данные металлы порознь не имеют.

Применение пайки для производства биметаллических изделий имеет ряд преимуществ, поскольку она обеспечивает надежное соединение, дает возможность сохранить в готовом изделии форму, размеры, свойства и структуру металла паяемых заготовок. Этому достигают в результате того, что пайку производят с общим нагревом при температуре, не вызывающей необратимого изменения свойств материала и формы заготовок, так как не требуется расплавления одного из соединяемых материалов. При изготовлении биметаллических изделий из разнородных металлов широко применяют капиллярную пайку [1].

Возможность осуществлять соединение при различных значениях температуры позволяет применять пайку для материалов самого широкого круга. В частности, способом высокотемпературной пайки успешно соединяют детали из литейных жаропрочных никелевых сплавов, не поддающихся сварке плавлением из-за массового появления трещин [2].

Капиллярную пайку выполняют с помощью самопроизвольного заполнения припоем зазора между соединяемыми деталями. Течение припоя и его удержание в зазоре осуществляется под действием капиллярной силы. При высокотемпературной пайке из-за растворения припоем паяемого металла утрачивается его способность растекаться и заполнять зазоры глубиной свыше 40... 50 мм. Кроме того, в более глубоких зазорах припой не удерживается капиллярной силой и вытекает. Поэтому капиллярную пайку можно использовать для изготовления биметаллических изделий лишь небольшого размера.

Прочность стыковых соединений, полученных способом капиллярной пайки, как правило, оказывается ниже таковой паяных деталей. Уменьшение ширины зазора способствует повышению прочности. Однако при слишком малых зазорах прочность при капиллярной пайке ухудшается и становится нестабильной из-за появления непропаев даже у небольших паяных образцов, применяемых лишь для механических испытаний [3–5]. Это также подтверждает ограниченность при капиллярной пайке глубины проникания припоя в узкие зазоры из-за растворения в нем паяемого металла.

С целью значительного увеличения размеров и прочности паяных соединений создали некапиллярные способы пайки, не использующие капиллярное течение для заполнения зазора припоем. Их еще с начала 1960-х гг. начали разрабатывать в Институте электросварки им. Е. О. Патона.

© Г. М. ГРИГОРЕНКО, Л. Г. ПУЗРИН, М. А. ПОЛЕЩУК, А. Л. ПУЗРИН, 2011



Одним из способов некапиллярной пайки, позволившим получать равнопрочные соединения, является пайка под давлением (прессовая сварка–пайка [2]). Он позволяет без непропаев выполнять особо тонкие паяные швы. Припой при этом способе заранее размещают между деталями в виде фольги или покрытия на подлежащих соединению поверхностях. В процессе пайки детали сдавливают, вытесняя наружу излишек расплавленного припоя. В отличие от капиллярной пайки, при этом способе смачивание соединяемых поверхностей и взаимодействие с паяемым металлом происходит уже после надежного заполнения зазора припоём.

Минимальная толщина припоя способствует его более полному взаимодействию с паяемым металлом, развитию процесса изотермической кристаллизации и получению равнопрочных соединений [2, 6]. Помимо повышения прочности, этот способ, в отличие от капиллярной пайки, не регламентирует размеры соединяемых поверхностей, которые ограничиваются лишь возможностями оборудования для нагрева и сдавливания деталей.

При другом способе некапиллярной пайки используют более широкие зазоры, чем капиллярные. Припой размещают над зазором, он затекает в него после расплавления под действием собственного веса. Смачивание стенок и взаимодействие припоя с основным металлом в данном случае также происходит после заполнения зазора. Для удержания припоя зазор предварительно герметизируют сваркой по всему наружному периметру, что позволяет соединять детали по большой площади. Этот способ не требует сдавливания, и размер соединяемых деталей зависит лишь от возможностей оборудования для нагрева.

Для осуществления процесса пайки требуется создать условия, обеспечивающие удаление оксидных пленок с поверхности припоя и стенок соединительного зазора. При капиллярной пайке на воздухе для этого на место соединения наносят флюсы, расплавляющиеся до начала плавления припоя. После расплавления припой смачивает под слоем флюса паяемые поверхности и вытесняет флюс из соединительного зазора. При очень малых зазорах этот процесс не всегда завершается, что приводит к непропаям.

Высокотемпературную пайку успешно выполняют в печах с защитной восстановительной или нейтральной газовой атмосферой, а также в вакууме. До настоящего времени механизм удаления оксидных пленок в газовых атмосферах и вакууме недостаточно изучен, и публикации по этому поводу содержат различные неубедительные гипотезы.

Так, утверждение о том, что в вакууме удаление оксидов происходит из-за их диссоциации вследствие низкого парциального давления кислорода, не подтверждается опытом. Необходимое для диссоциации оксидов давление кислорода должно быть значительно ниже того, при котором успешно производят пайку [6].

Вызывает сомнение и информация о том, что при пайке в восстановительной атмосфере газ проникает в капиллярные зазоры шириной, например 0,05... 0,10 мм, в количестве, необходимом для полного восстановления оксидов на его стенках. Относительно же причин о возможности ведения пайки в нейтральной газовой среде со значительно более высоким, чем в вакууме, парциальным давлением кислорода вообще никаких предположений не высказывается.

В 1960-е гг. в Институте электросварки им. Е. О. Патона обнаружили явление, объясняющее механизм устранения оксидных пленок при высокотемпературной пайке сталей. Установлено, что при нагреве стальных деталей до 1000... 1300 °С в условиях, исключающих доступ воздуха, их поверхность самопроизвольно очищается от оксидов [7, 8]. Это происходит из-за растворения стальными деталями кислорода, содержащегося в оксидах, по-видимому, в результате естественного стремления к уменьшению свободной энергии.

Обнаруженное явление объясняет факт устранения оксидных пленок не только при высокотемпературной пайке, но и сварке без расплавления, а также при получении биметаллов способом горячей прокатки и прессования. Есть все основания утверждать, что устранение оксидной пленки с поверхности деталей из углеродистых, легированных и высоколегированных сталей происходит при их высокотемпературной пайке в активной или нейтральной газовой среде, а также в вакууме не за счет воздействия среды, которая лишь предотвращает доступ атмосферных газов к паяемым деталям, а самопроизвольно, очевидно, путем так называемого внутреннего окисления металла [9].

С использованием явления самопроизвольной очистки соединяемых поверхностей от оксидных пленок в Институте электросварки им. Е. О. Патона разработали способ некапиллярной автовакуумной пайки (АВП) [10], которую осуществляют путем создания автономного вакуума только в соединительном зазоре. Для АВП зазор герметизируют по периметру с помощью дуговой сварки, предварительно разместив в нем припой.

При АВП под давлением припоя располагают между соединяемыми поверхностями, а при пайке с затеканием припоя — над зазором в питателе, соединенном с зазором в его верхней части (рис. 1).

Способ АВП не требует специального оборудования и используется прежде всего для пайки крупных стальных изделий массой, например, 20 т путем их нагрева в печах с обычной воздушной атмосферой.

Вот некоторые примеры успешного применения Институтом электросварки им. Е. О. Патона некапиллярных способов пайки. Пайку под давлением использовали для весьма ответственных изделий — биметаллических роторов турбокомпрессорных агрегатов жидкостных ракетных двигателей (роторов ТНА ЖРД). Этим способом соединяли газотурбинные лопатки из литейных жаропрочных сплавов с де-

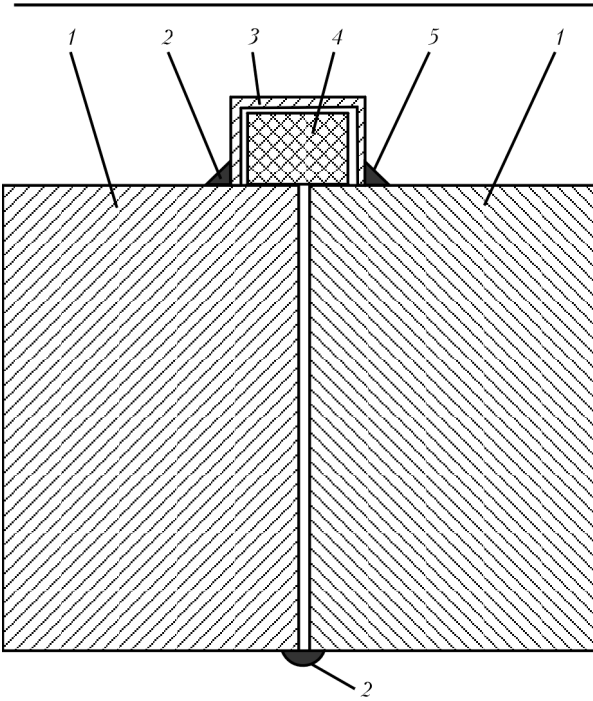


Рис. 1. Схема АВП с широкими зазорами: 1 — основной металл; 2 — герметизирующие сварные швы; 3 — герметичный питатель; 4 — припой

формируемыми сталями дисков роторов. Лопатки и диски из высоколегированных хромоникелевых сталей и сплавов проявляют большую склонность к трещинам в металле шва и околошовной зоны при сварке плавлением. В этом случае в металле шва возникают также специфические трещины от зазоров между лопатками. Применение пайки под давлением полностью исключило образование трещин.

Процесс пайки осуществляют в вакуумных установках. Наружный край диска и комли лопаток нагревают индуктором. Давление для прижатия комлей лопаток к диску через тонкий слой припоя создают с помощью стального технологического кольца, надеваемого на полки лопаток горячей посадкой (рис. 2).

Технологическое кольцо, оставаясь при пайке холодным, препятствует тепловому расширению диска с лопатками и создает необходимое для пайки давление.



Рис. 2. Диск с лопатками, собранный технологическим кольцом для пайки под давлением

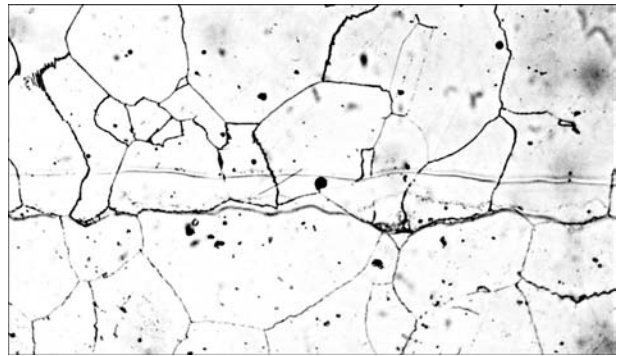


Рис. 3. Микроструктура (X200) металла шва в роторе, полученном пайкой под давлением (вверху лопатка, сплав ВЛ 7-20, внизу диск, сталь ЭИ 481)

Микроструктура места соединения лопаток с диском одного из типов роторов приведена на рис. 3. Растворение припоя в паяемом металле способствует образованию в соединении общих зерен.

На ряде предприятий изготовлены опытные партии паяных роторов, которые успешно прошли ресурсные испытания на рабочих режимах, а также

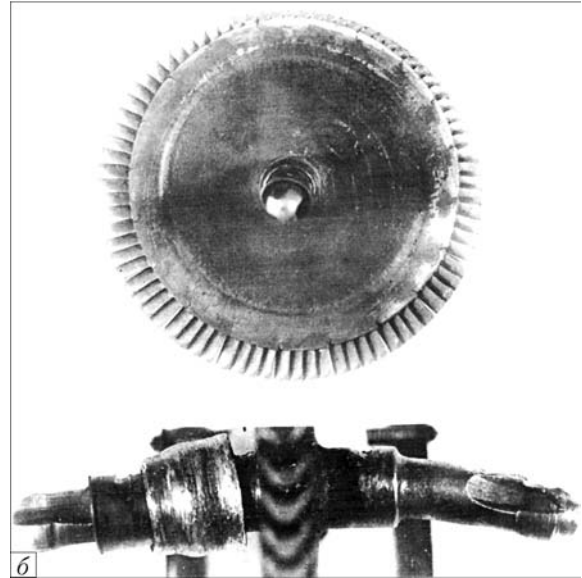
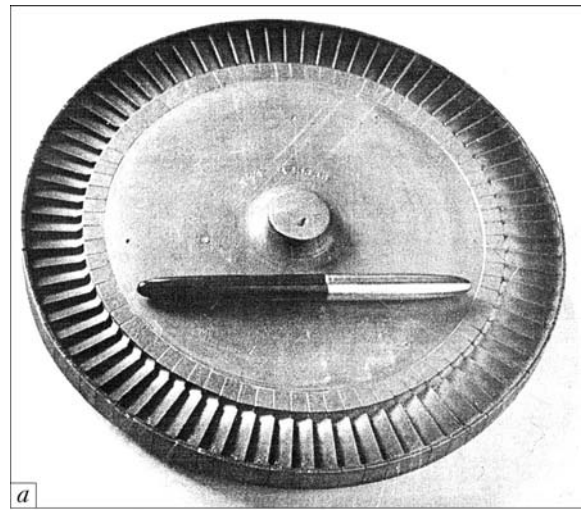


Рис. 4. Диск с лопатками после пайки (а) и горячих испытаний с трехкратной перегрузкой по максимальным оборотам (б)

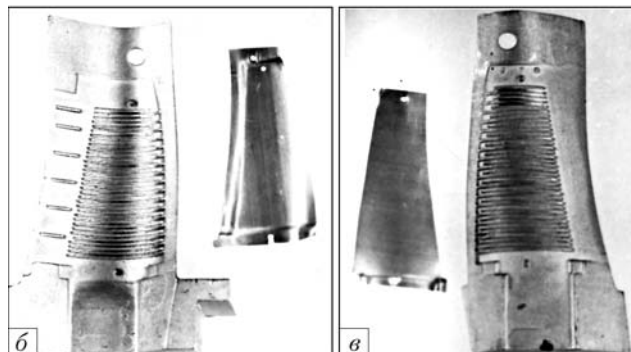
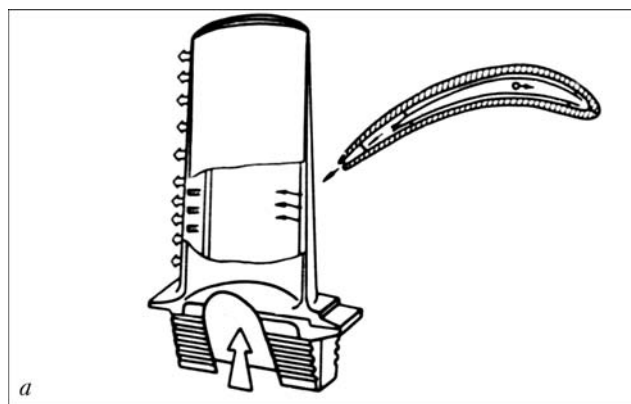


Рис. 5. Составная охлаждаемая газотурбинная авиационная лопатка: *а* — схема охлаждения; *б* — заготовка спинки и дефлектора; *в* — заготовка корытца и дефлектора

со значительной перегрузкой по оборотам для доведения роторов до разрушения.

На рис. 4 показан один из таких роторов после пайки (рис. 4, *а*) и испытаний с трехкратной перегрузкой по оборотам (рис. 4, *б*). В результате деформации диска и вслед за этим изгиба вала произошло истирание лопаток о статор. Однако при этом ни разу не зафиксировано разрушений по месту соединения лопаток с диском.

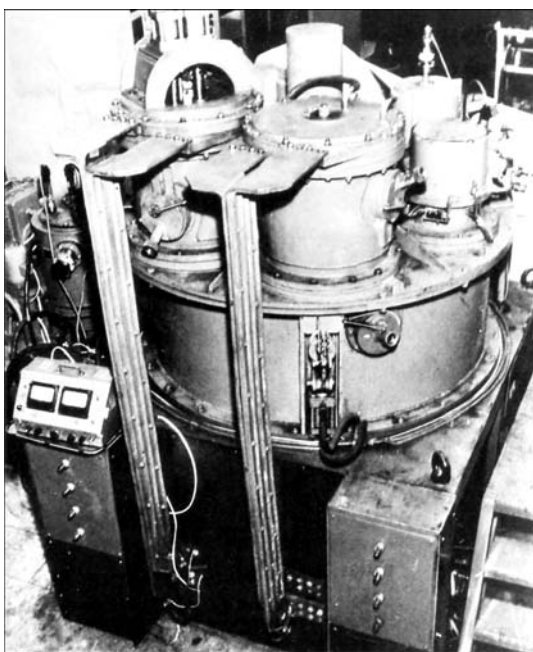


Рис. 6. Высокопроизводительная установка У925 для пайки под давлением в вакууме составных охлаждаемых газотурбинных авиационных лопаток

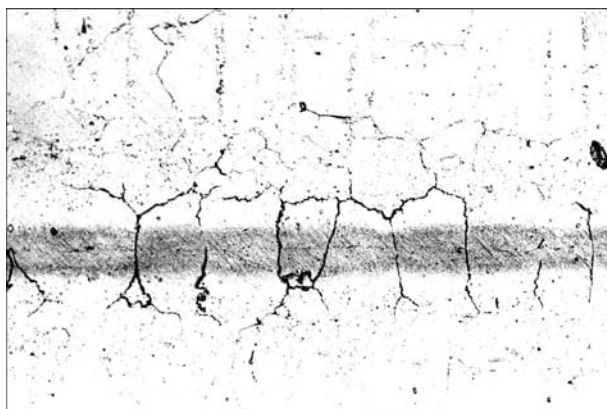


Рис. 7. Микроструктура (X150) паяного шва на входной кромке лопатки из сплава ВЖЛ12у

Пайку под давлением также успешно применяли на МНПО «Союз» (г. Москва) для создания составных охлаждаемых газотурбинных авиационных лопаток из литейных жаропрочных никелевых сплавов, которые, в отличие от охлаждаемых воздухом цельнолитых, характеризуются более высокой эффективностью охлаждения и повышенными газодинамическими характеристиками (рис. 5) [11].

Высокая эффективность охлаждения обеспечивается применением более совершенной формы дефлектора, припаиваемого отдельно к спинке и корытцу лопатки до их пайки вместе. Их применение в цельнолитой лопатке невозможно.

Для пайки под давлением таких биметаллических лопаток создали специализированную высокопроизводительную вакуумную печь карусельного типа У925 (рис. 6) [12]. Ускоренное охлаждение паяемых деталей обеспечивается путем их перемещения в вакуумные камеры с холодными стенками.

Из-за интенсивного охлаждения во входной кромке даже у цельнолитых лопаток могут возникать термические трещины, для предотвращения которых в металле паяного шва на входной кромке отработан технологический процесс получения равнопрочного паяного соединения (рис. 7). Одновременно с некоторым конструктивным усовершенствованием профиля лопаток [13] это позволило обеспечить надежную работу лопаток. Изготовленные пайкой под давлением два типа составных охлаждаемых лопаток прошли испытания на макси-

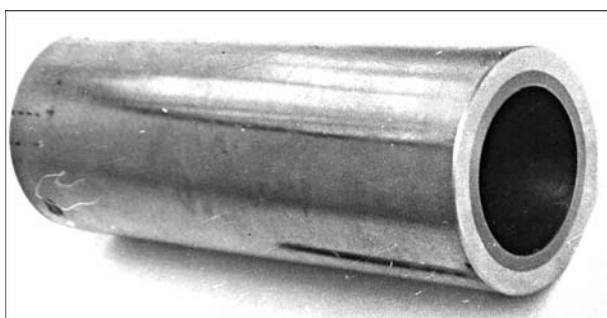


Рис. 8. Заготовка диаметром 86X13 мм, длиной 300 мм для прокатки тонкостенной биметаллической трубы диаметром 21,6X0,4 мм из стали ЭИ 847 и железа армо, полученная с использованием пайки под давлением

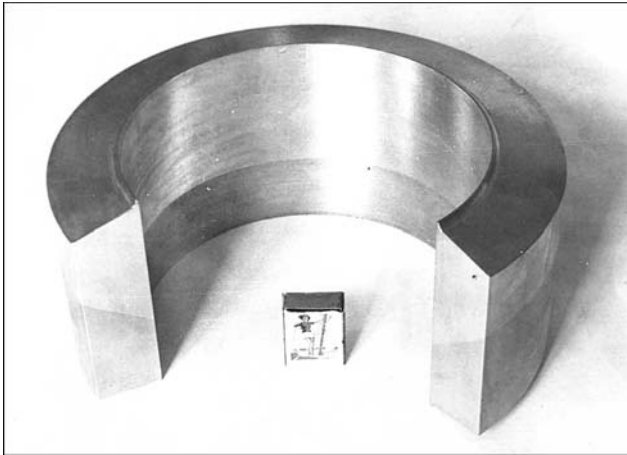


Рис. 9. Переходный элемент (диаметр 350×50 мм) для сварки трубы из стали 12ХМФ с трубой из стали 10Х18Н10Т, изготовленный АВП под давлением

мальном рабочем режиме в течение двойного ресурса без каких-либо разрушений.

Пайку под давлением применили также для получения заготовок жаропрочных биметаллических труб. Из них с применением холодной прокатки получали трубы с особо тонкой стенкой для транспортировки жидкометаллического теплоносителя. Такие трубы должны иметь внутри покрытие из чистого железа, предотвращающее коррозионное разрушение расплавленным теплоносителем основного слоя из жаропрочной хромоникелевой стали.

Пайку трубных заготовок (120×300 мм) производили в созданной для этого вакуумной печи с индукционным нагревом. Наружную заготовку из жаропрочной стали нагревали в индукторе до температуры пайки. Затем внутрь нагретой вводили холодную заготовку из железа с нанесенным гальваническим способом на ее наружную поверхность припоем. По мере разогрева внутренняя заготовка прижимается к наружной, в результате чего обеспечивается необходимое для пайки давление [14].

На Никопольском Южнотрубном заводе, где внедрены в производство вакуумная печь и установка для нанесения припоя, производили паяные заготовки (рис. 8). Из них путем холодной прокатки изготавливали жаропрочные биметаллические трубы с особо тонкой стенкой (21,6×0,4 мм).

Способом некапиллярной АВП под давлением получали биметаллические переходные элементы для ручной сварки на монтаже толстостенных трубопроводов из легированных теплоустойчивых и высоколегированных хромоникелевых сталей [15]. Эти элементы, качественно сваренные в цеховых условиях, дают возможность производить на монтаже сварку только однородных сталей взамен гораздо более сложной сварки разнородных, что значительно повышает надежность соединений в трубопроводах высокого давления.

С использованием АВП под давлением получали биметаллические переходники для сварки труб диаметром 350 мм со стенкой 50 мм из сталей 12ХМФ и 10Х18Н10Т. Соединение выполняли по конусной



Рис. 10. Обечайка толстостенного сосуда с плакировкой из нержавеющей листа, припаянного АВП

поверхности, расположенной под углом в 45° к оси трубы. На эту поверхность укладывали припой в виде фольги. После сборки место соединения герметизировали двумя кольцевыми дуговыми швами. Заготовки сдавливали на прессе и нагревали на воздухе индукционным способом. Полученные переходники (рис. 9) после термической обработки отличались равнопрочностью соединения.

Способ АВП с широкими зазорами успешно применили на ПО «Ждановтяжмаш» для изготовления биметаллических сосудов. Его использовали для плакирования нержавеющей сталью обечайки толстостенных сосудов различного назначения [16]. Для этого к внутренней поверхности цилиндрической заготовки сосуда припаявали за один нагрев свернутый в обечайку нержавеющей лист площадью в несколько квадратных метров (рис. 10).

Нержавеющий лист характеризуется стабильными толщиной и составом, а пайка при температуре



Рис. 11. Электрошлаковая сварка корпуса транспортного контейнера ТК10 из толстостенных обечайки с припаянной нержавеющей футеровкой

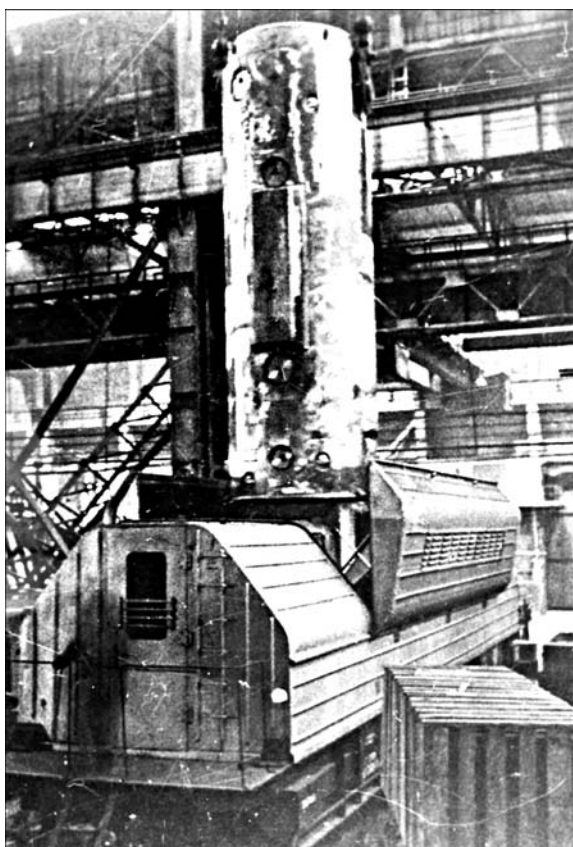


Рис. 12. Готовый контейнер ТК10 во время погрузки в вагон для транспортировки

его закалки способствует получению высокой коррозионной стойкости. Перед пайкой, согласно технологическому процессу, производят контроль вакуумной плотности облицовки, что гарантирует ее непроницаемость в условиях агрессивной среды и дает основание считать плакирование нержавеющей сталью массивных изделий способом АВП наиболее качественным.

В процессе работы установлено, что после высокотемпературной пайки с последующей нормализацией и отпуском прочностные свойства металла корпуса не ухудшаются, а показатели его пластичности и вязкости повышаются. Наряду с этим показано, что последующая термообработка не снижает стойкости нержавеющей облицовки против межкристаллитной коррозии.

Способ АВП с широкими зазорами успешно применили для изготовления толстостенных биметаллических контейнеров различных типоразмеров, предназначенных для перевозки отработанного ядерного топлива [17]. Наиболее крупные из них (ТК10 для перевозки топлива реакторов ВВЭР 1000) сваривали с применением электрошлаковой сварки из пяти заготовок массой около 20 т каждая (рис. 11). Заготовки имели внутренний диаметр примерно 1 м, толщину стенки 400 мм и высоту приблизительно 1200 мм. Площадь паяного шва на одной заготовке составляла около 4 м<sup>2</sup> и более 20 м<sup>2</sup> на всем контейнере. Поверхность металла в зоне электрошлаковых швов наплавливали нержавеющей сталью с помощью дуговой сварки. Масса готового контейнера

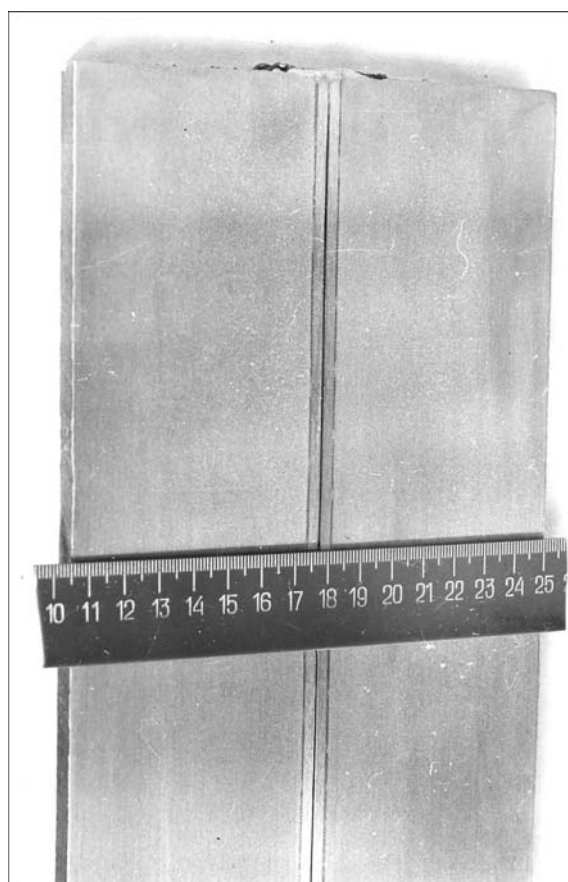


Рис. 13. Макрошлиф толстолистового биметалла, полученного способом АВП симметричного пакета

составляла 100 т (рис. 12). Это самые массивные паяные изделия.

В ходе плакирования нержавеющей сталью цилиндрических обечаек сосудов отработанный технологический процесс получения способом АВП толстолистового биметалла, предусматривающий пайку листов нужного размера, собранных по схеме симметричного пакета, используемого для получения листового биметалла способом горячей прокатки.

Паяный пакет не требует последующей прокатки и обеспечивает надежное соединение листов в процессе пайки (рис. 13).

Аналогичным путем можно изготавливать паяные заготовки для биметаллического сортового проката, получаемого последующими прессованием или прокаткой, которые гарантируют сцепление слоев вне зависимости от степени обжатия. Прочность сцепления слоев металла, обеспечиваемая пайкой, в два раза превышает требования ГОСТ 10885–75 «Сталь горячекатаная толстолистовая двухслойная».

Примеры успешного применения некапиллярной пайки подтверждают значительное расширение ее возможностей, по сравнению с капиллярной. Некапиллярная пайка позволяет получать равнопрочные соединения и практически снимает ограничения на размеры изделий.

Для более широкого применения технологии высокотемпературной некапиллярной пайки следует продолжить исследование особенностей данного





процесса. Это позволит значительно расширить сферу ее эффективного использования.

**Выводы**

1. Показано, что пайка характеризуется рядом преимуществ при соединении разнородных материалов. Основным ее видом является капиллярная, которая из-за специфики процесса позволяет получать биметаллические изделия лишь небольшого размера и, как правило, неравнопрочные.

2. Установлено, что созданные в Институте электросварки им. Е. О. Патона технологические процессы некапиллярной пайки позволяют получать биметаллические материалы и изделия практически неограниченных размеров. Кроме того, некапиллярная пайка под давлением дает возможность осуществлять равнопрочные соединения.

3. Примеры успешного применения Институтом электросварки им. Е. О. Патона различных технологических процессов некапиллярной пайки убедительно доказывают ее преимущества перед пайкой капиллярной.

4. Необходимо дальнейшее исследование особенностей процессов, протекающих при некапиллярной пайке, с целью расширения областей ее применения.

1. *Лашко С. В., Лашко Н. Ф.* Пайка металлов. — М.: Машиностроение, 1988. — 376 с.
2. *Медовар Б. И.* Сварка жаропрочных аустенитных сталей и сплавов. — М.: Машиностроение, 1966. — 432 с.
3. *Петрунин И. Е., Лоцманов С. Н., Николаев Г. А.* Пайка металлов. — М.: Металлургия, 1973. — 282 с.
4. *Справочник по пайке* / Под ред. И. Е. Петрунина. — М.: Машиностроение, 1984. — 400 с.
5. *Брукер Х. Р., Битсон Е. В.* Пайка в промышленности. — М.: Оборонгиз, 1957. — 296 с.
6. *Об изотермической кристаллизации при прессовой сварке-пайке (ПСР) жаропрочных никелевых сплавов* // Б. И. Медовар, Л. Г. Пузрин, Г. А. Бойко и др. // Ис-

- следования по жаропрочным сплавам: Сб. науч. ст. — М.: Изд-во АН СССР. — 1967. — С. 161–165.
7. *Самостоятельная очистка металла от окисных пленок* // Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, И. В. Кирдо и др. // Докл. АН СССР. — 1964. — 159, № 1. — С. 72–73.
8. *О растворении газов воздуха в твердом металле в процессе самопроизвольной очистки его поверхности* // Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, Л. Г. Пузрин и др. // Там же. — 1968. — 181, № 1. — С. 70.
9. *Окисление металлов и сплавов.* — М.: Металлургия, 1965. — 428 с.
10. *Пузрин Л. Г., Бойко Г. А., Атрошенко М. Г.* Автовакуумная высокотемпературная пайка. — Киев: О-во «Знание» Украинской ССР, 1975. — 18 с.
11. *Фаворский О. Н., Копелев С. З.* Охлаждаемые воздухом лопатки газовых турбин // Теплоэнергетика. — 1981. — № 8. — С. 7–11.
12. *Пузрин Л. Г., Пещерин Е. И., Чесноков Л. В.* Высокопроизводительная вакуумная печь У925 // Надежность и качество паяных изделий. — М.: НТО «Машпром», 1982. — С. 108–109.
13. *К надежности паяного шва входной кромки составной охлаждаемой лопатки высокотемпературной турбины* // Е. А. Великоиваненко, В. В. Кравченко, В. И. Махненко и др. // Теплоэнергетика. — 1990. — № 4. — С. 52–54.
14. *Бойко Г. А., Пузрин Л. Г.* Новая технология сварки биметаллических трубных заготовок, основанная на применении прессовой сварки-пайки и автовакуумной сварки давлением // Тр. конф. молодых инженеров трубной пром-сти. — М.: — Металлургия, 1968. — С. 98–101.
15. *Новые способы изготовления переходных элементов для сварки разнородных сталей* // Б. И. Медовар, Л. В. Чекотило, В. Л. Артамонов и др. // Автомат. сварка. — 1967. — № 10. — С. 58–62.
16. *Пузрин Л. Г., Атрошенко М. Г., Алексеенко В. И.* Автовакуумная пайка лакирующего слоя обечаек сосудов высокого давления // Проектирование технологического процесса пайки — основа повышения качества изделий и эффективности производства: Сб. науч. ст. — М.: ЦП НТО «Машпром», 1978. — С. 193–195.
17. *Автовакуумная пайка осеботоростенных сосудов массой до 100 т на ПО «Ждановтяжмаш»* // Л. Г. Пузрин, М. Г. Атрошенко, И. Г. Пещерин и др. // Проблемы сварки и специальной электрометаллургии. — Киев: ИЭС им. Е. О. Патона, 1984. — С. 76–77.

Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины, Киев  
Поступила 10.06.2011

**Разработано в ИЭС им. Е. О. Патона**

Отделом защитных покрытий института ведутся работы в области газотермического напыления покрытий с псевдосплавной структурой, которые характеризуются высоким уровнем износостойких и антифрикционных свойств. С целью защиты от абразивного износа поверхности медных изделий разработана серия покрытий, наносимых способом электродуговой металлизации, структура которых состоит из смеси частиц меди со вторым компонентом, обеспечивающим стойкость покрытия против абразивного износа (например, NiCr, Mo, Ti и др.). Одним из объектов применения этих покрытий служат плиты кристаллизаторов МНЛЗ. Наличие меди в структуре покрытий (примерно 50 мас. %) обеспечивает сохранение довольно высокой теплопроводности покрытия (до 200...300 Вт/м·град), что является важным фактором в условиях работы МНЛЗ. Толщина покрытий, наносимых для этой цели, достигает 2 мм. Исследования свойств покрытий показали, что горячая твердость покрытия Cu-NiCr (при 20...400 °С) превышает твердость меди в 3 раза, прочность на разрыв составляет 240 МПа. Стойкость псевдосплавных покрытий против абразивного изнашивания при 300...350 °С превышает износостойкость чистой меди в 5...100 раз в зависимости от состава покрытия. Ведутся работы по испытанию указанных покрытий в реальных условиях эксплуатации МНЛЗ. На псевдосплавные покрытия на основе меди и способ их нанесения получены патенты Украины № 55585 и 58852.