

В.П. Лихошва, д-р техн. наук, проф., зав. отделом

А.П. Шатрава, канд. техн. наук, ст. науч. сотр., e-mail: shatrava@ptima.kiev.ua

О.А. Пеликан, науч. сотрудник

Физико-технологический институт металлов и сплавов НАН Украины, г. Киев, Украина

Современные способы производства биметаллических изделий

В статье приведены история и результаты производства и применения биметаллических материалов со времени их изобретения по сегодняшний день. Приведены основные технологические параметры и результаты различных методов их получения – традиционных, таких как прессование, литье, прокатка, сварка взрывом и др. и современных – сварка, наплавка, напыление и др.

В статье показано, что применение биметаллических изделий получает все большее распространение при производстве и восстановлении изношенных деталей в химической, нефтехимической, пищевой и общемашиностроительной промышленности благодаря получению уникальных комплексов свойств: высокой прочности, жаропрочности, коррозионностойкости, электропроводности и теплопроводности, технологичности и др.

Также в статье показано участие ученых и специалистов ФТИМС НАН Украины в разработке традиционных литейных методов получения биметаллов, а также предложены подходы к созданию новых гибридных методов литейно-лазерной обработки для получения биметаллических и многослойных изделий, что позволяет совместить преимущества использования концентрированных источников энергии с традиционными литейными технологиями производства и восстановления деталей машин.

Ключевые слова: биметаллические конструкции, классификация биметаллов, прокатка, центробежное литье, сварка взрывом, лазерная наплавка, литейно-лазерная обработка.

В современной литературе [1–5] понятие биметалл (от би... и металл) определяется как металлический материал, состоящий из двух слоев различных металлов или сплавов (например, сталь и алюминий, сталь и ниобий, сталь и медь, сталь и чугун, алюминий и титан, титан и молибден и др.). Применение биметаллических изделий или слоистых композиций получает все большее распространение при производстве и восстановлении изношенных деталей в химической, нефтехимической, пищевой и общемашиностроительной промышленности благодаря получению уникальных комплексов свойств: высокой прочности, жаропрочности, коррозионностойкости, электропроводности, теплопроводности, технологичности и других, которыми не обладают составляющие композиционных материалов по отдельности. При этом композиция может состоять не только из двух, но и из большого количества металлов, обладающих различными характеристиками.

По основному назначению современные биметаллы можно разделить на 3 группы: износостойкие, коррозионностойкие и антифрикционные.

Все разнообразие биметаллов различают также по химическому составу слоев, по форме изделий, по способу получения, по расположению, геометрическим параметрам слоев и др.

Для работы в экстремальных условиях применяют биметаллические материалы, основным слоем которых являются нержавеющие и жаропрочные сплавы, ниобий, тантал и другие тугоплавкие материалы. Однако использование таких дорогих материалов неиз-

бежно сказывается на экономической эффективности их производства.

Первое специализированное предприятие «Биметалл» было основано во Франции в 1890 г., затем стали появляться предприятия в США и Германии. В СССР массовое производство биметаллов началось в 1930-х годах производством биметаллической проволоки (сталь-медь).

По способу образования связи между слоями биметаллы делятся на диффузионные, металлургические и адгезионные.

В работе [2] рассмотрены три сочетания агрегатных состояний металлов в зоне контакта при изготовлении биметаллических изделий: твердый с твердым, твердый с жидким и жидкий с жидким. В работе отмечено, что в последнем случае участок контакта соединяемых металлов доведен до расплавления, а взаимная диффузия и кристаллизация способствуют прочному соединению материалов.

Также, многими авторами [1–6] отмечается, что классификацию биметаллов можно проводить по признаку наличия или отсутствия пластического деформирования соединения. Наиболее распространенными методами получения биметаллов с применением пластической деформации являются: прессование, прокатка, сварка взрывом и др. Для метода без пластической деформации характерны такие процессы, как литье, сварка, наплавка, напыление и другие. Эти данные свидетельствуют о широком спектре способов и технологических приемов, используемых при изготовлении биметаллических изделий (таблица).

Основные способы производства биметаллических изделий

Способы производства биметаллических изделий																			
Механические			Литейные методы				Сварные методы				Наплавка и напыление								
Прессование	Прокатка	Ковка	Штамповка	Литье в ЖС формы	Центробежное	Под давлением	Литье в кокиль	Дуговая	Плазменная	Электрошлаковая	Лазерная	Диффузионная	Взрывом	Вибродуговая	Газовая	Плазменная	Лазерная	Детонационное	Электронно-лучевая

Кроме того, существуют еще такие методы, как волочение, пайка, холодная сварка, ультразвуковая сварка, сварка трением, металлизация напылением и др., однако эти способы применяются гораздо реже.

Прокатку, как наиболее распространенный способ получения биметаллов, используют для производства биметаллических листов, труб, профилей, прутков [5]. Технология горячей прокатки нескольких слоев металла включает в себя подготовку (очистку, травление, промывку, обезжиривание) и сборку компонентов пакета, предварительный нагрев и прокатку, резку, термообработку, правку и отделку.

Для предотвращения окисления прокатываемых слоев применяют различные способы – покрытия, наносимые электролитическим способом, наплавкой или напылением, слои из фольги и пиррофорных веществ. Для обеспечения лучшей адгезии также используют промежуточные слои (предварительное плакирование).

Схемы предварительной укладки биметаллических заготовок в пакеты показаны на рис. 1.

Рулонная прокатка биметаллов является более производительной, чем пакетная и является типичным примером непрерывного автоматизированного процесса (рис. 2).

Одной из главных проблем при прокатке биметаллов является их расслоение [4]. Для уменьшения этого явления применяется прокатка плакирующего слоя из порошка, а также прокатка в профильных валках [5].

Начиная с 60-х годов, в ФТИМС НАН Украины были разработаны литейные способы изготовления биметаллических изделий из различных материалов [5–7]. Из многообразия используемых методов получения биметаллических литых изделий, разработанных этими авторами, можно выделить следующие:

- одновременная или последовательная заливка жидких сплавов в форму с разделительной перегородкой;
- последовательная заливка в форму двух и более жидких сплавов;
- намораживание жидкого металла на твердую заготовку;
- заливка жидкого металла на твердую заготовку, предварительно расположенную в литейной форме или изложнице (рис. 3).

На основании полученных результатов [8] можно утверждать, что определяющим фактором для создания

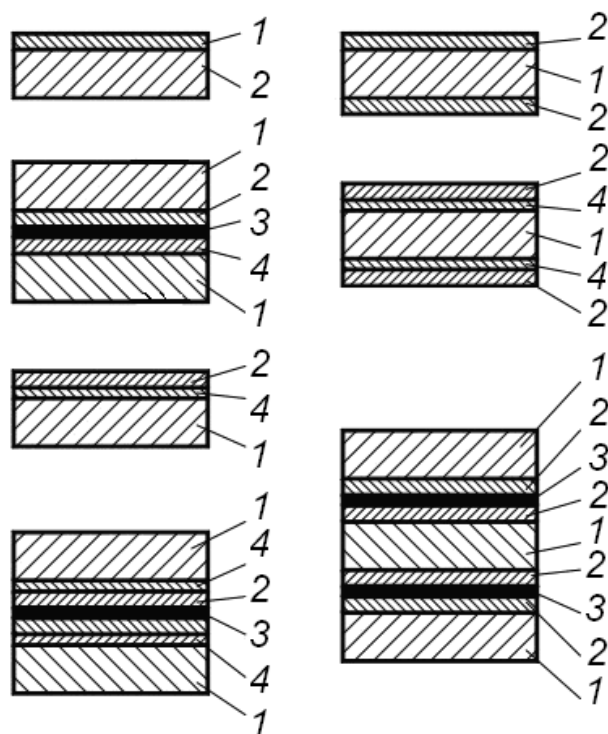


Рис. 1. Схемы укладки биметаллов в пакеты перед совместной прокаткой: 1 – основной слой; 2 – плакирующий слой; 3 – разделительный подслой; 4 – соединительный подслой [1]

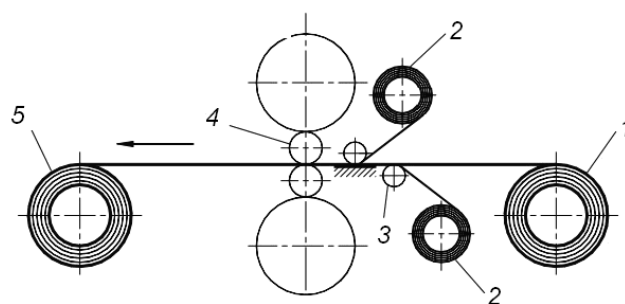


Рис. 2. Рулонная прокатка трехслойного биметалла [3]: 1 – размотчик с рулоном основного слоя; 2 – размотчик с рулоном полосы плакирующего слоя; 3 – направляющие ролики; 4 – рабочие валки прокатного стана; 5 – моталка с рулоном трехслойной полосы

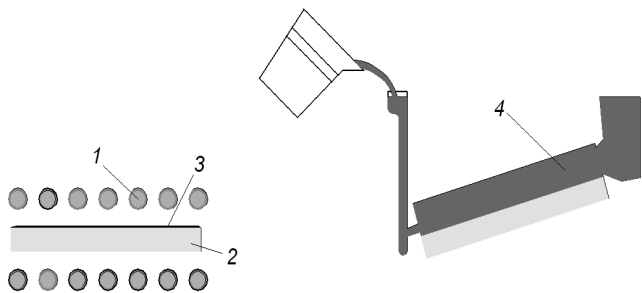


Рис. 3. Схема процесса заливки жидкого металла на твердую заготовку [7]: 1 – индуктор; 2 – стальная заготовка; 3 – защитный флюс; 4 – износостойкий чугун

соединения биметаллов, состоящих из нержавеющей стали и серого чугуна, является массоперенос углерода из одного материала в другой, в отличие от диффузии Fe, Cr или Ni.

Результаты [9] показали, что при получении двухслойных отливок из Al и Si методом литья жидкого металла на твердую заготовку, происходит образование интерметаллидов Al_2Si на границе раздела, которые пагубно влияют на прочность соединения биметаллических слоев. Авторы вынуждены были использовать прослойку из Ni-P как диффузионный барьер и защитную пленку, которая эффективно уменьшала образование интерметаллидов в переходном слое.

Цилиндрические заготовки биметаллов получают также методами центробежного литья [10–13]. При этом в полость плакируемой детали расплавленный металл подается через желоб с воронкой, а заготовку подвергают либо предварительному нагреву, либо нагреву непосредственно на центробежной литейной машине газовыми горелками или токами высокой частоты. Схема процесса центробежного литья биметаллических изделий показана на рис. 4.

Разработанная автором работы [11] технология изготовления пальцев гусеничных тракторов прессованием из биметаллических заготовок, полученных методом центробежного литья, позволяет получать качественные длинномерные изделия, износостойкость которых в 2–3 раза выше, чем у серийных.

Технология литья заготовок для цилиндрических гильз центробежным способом [12], которая заключается в последовательной заливке в металлическую форму серого и низколегированного чугуна, позволяет экономить до 70 % легированного чугуна.

При производстве медно-алюминиевого биметалла с использованием центробежного литья авторами работы [13] отмечается, что для создания прочной металлургической связи между двумя металлами очень важно отсутствие примесей и оксидов металлов в месте их соединения.

Метод литья биметаллов является более простым, по сравнению с прокаткой, однако у него существуют свои технологические ограничения: плохая заполняемость металла узких зазоров между изложницей и пластинами, вероятность расплавления металла пластин, невозможность получения композиций из материалов, образующих легкоплавкие фазовые состояния.

Главной особенностью данных технологий является соединение различных металлов с образованием металлургической связи между составными частями. Примерами биметаллических пар служат: сталь углеродистая – сталь нержавеющая; сталь углеродистая – чугун хромистый и др.

Сварка, как эффективный технологический процесс соединения разнородных материалов, получил широкое распространение в исследованиях Института электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины [14]. Среди методов сварки в настоящее время используются такие методы, как сварка плавлением, сварка давлением и пайка, дуговая сварка, диффузионная сварка, сварка взрывом и другие.

Сварка взрывом является производительным и малозатратным методом получения биметаллических деталей [15–18]. Уникальность этого процесса заключается в одновременном создании высокого давления 10 000–50 000 атмосфер и скорости нанесения плакируемого слоя порядка 500–1000 м/с. В зоне контакта происходит упрочнение металла. Сварка взрывом позволяет соединять металлы с разнородными свойствами, при этом без применения специализированного оборудования (рис. 5).

Ее применяют как для получения плоских листовых биметаллических заготовок, так и для цилиндрических обечаек. Однако этот метод имеет и существенные недостатки: несоблюдение режима сварки взрывом может привести к образованию трещин,

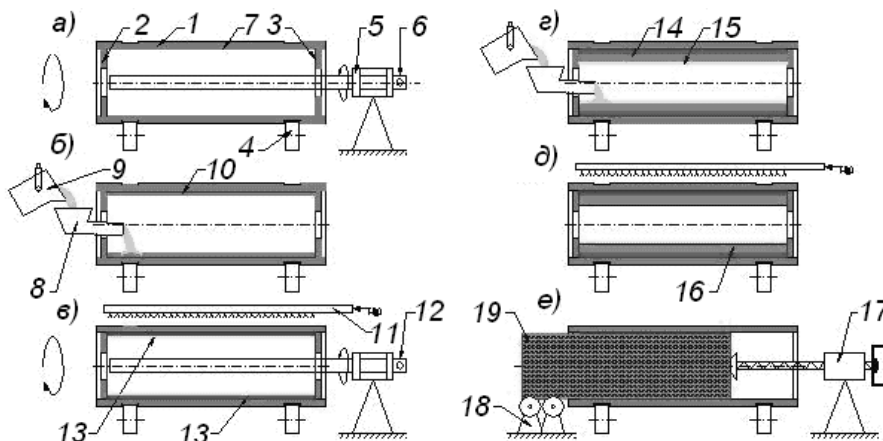


Рис. 4. Схема процесса центробежного литья биметаллических изделий [10]: а – нанесение теплоизолятора; б – заливка рабочего слоя; в – охлаждение и подача флюса; г – заливка внутреннего слоя; д – охлаждение изложницы; е – извлечение заготовки. 1 – изложница; 2 – крышка; 3 – слой теплоизолятора; 4 – опорный ролик; 5 – направляющая стойка; 6 – устройство нанесения теплоизолятора; 7 – слой теплоизолятора; 8 – чаша; 9 – ковш; 10 – расплав рабочего слоя; 11 – устройство охлаждения; 12 – устройство подачи флюса; 13 – пленка флюса; 14 – расплав внутреннего слоя; 15 – пленка жидкого флюса; 16 – внутренний слой; 17 – устройство извлечения заготовки; 18 – приемный ролик; 19 – биметаллическая заготовка

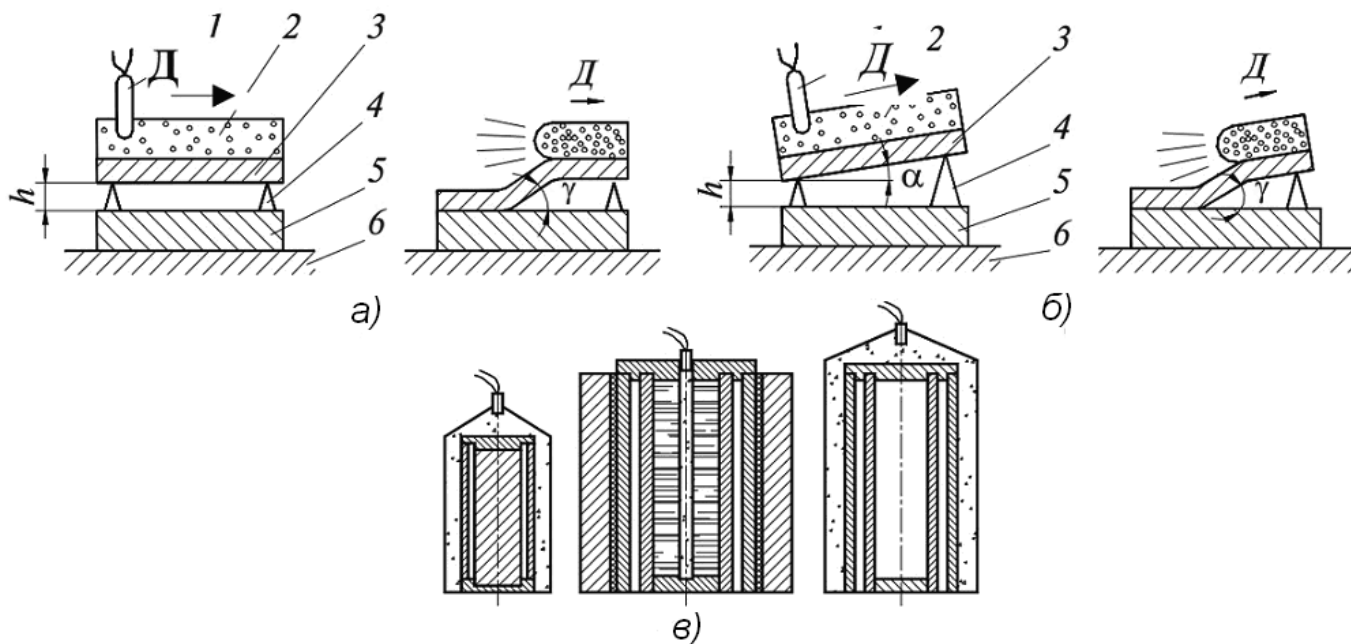


Рис. 5. Сварка биметаллов взрывом [1]: а – параллельная схема сварки; б – угловая схема сварки; в – сварка цилиндрических обечаек. 1 – детонатор; 2 – заряд взрывчатого вещества; 3 – метаемая пластина; 4 – установочный элемент; 5 – основная пластина; 6 – основание

оплавлению в зоне контакта и даже к разрушению биметалла, метод эффективен для толстолистовых материалов и требует рихтовки после проведения основных работ.

Лазерная сварка проплавным швом [19] может рассматриваться как перспективный метод получения биметаллических соединений, поскольку процесс может быть автоматизирован и позволяет соединять металлы различных комбинаций в широком диапазоне толщин. Однако механические свойства соединений после такой сварки неоднородны, поэтому для их уравнивания при необходимости можно применять термическую обработку.

Такие методы получения биметаллов как: напыление, плакирование или осаждение не позволяют получить довольно прочную связь покрытия с основой, да и малая толщина таких покрытий в ряде случаев не пригодна для условий эксплуатации многих изделий.

Наплавка, как метод получения биметаллических и многослойных изделий [20–23], позволяет получать прочную металлургическую связь покрытия с основой, причем локальный характер воздействия на поверхность подложки не приводит к чрезмерному увеличению глубины переходного слоя, а также наплавка позволяет получать многослойные наплавочные покрытия на локальных рабочих участках деталей (рис. 6).

Вопросам лазерной наплавки, как отдельному методу поверхностной обработки, посвящен целый ряд работ отечественных и зарубежных авторов [24–26]. Этот процесс рассматривается многими авторами в качестве технологии для ремонтных работ и восстановления изношенных деталей. Данные исследования носят прикладной характер и основаны на эмпирических зависимостях. Однако в последнее время намечилось более общее рассмотрение процесса лазерной наплавки.

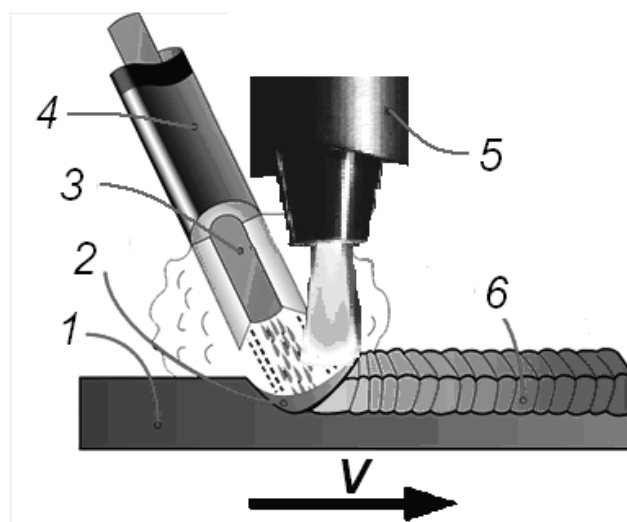


Рис. 6. Метод наплавки, функциональная схема [19]: 1 – подложка; 2 – ванна расплава; 3 – присадочный материал; 4 – система подачи; 5 – источник нагрева; 6 – наплавочный слой

К настоящему времени в ФТИМС НАН Украины разработан ряд технологий для повышения эксплуатационных характеристик и восстановления рабочих поверхностей деталей машин бурового инструмента, двигателей внутреннего сгорания, железнодорожного транспорта и др. с использованием лазерной наплавки. В работах [27–30] впервые предложен способ получения покрытий из композиционных материалов с помощью лазерного излучения на основе железо- и медьсодержащих сплавов, с регулярной структурой типа: твердая матрица – мягкие включения и мягкая матрица – твердые включения (в зависимости от состава композиций). В данных работах представлен

теплофизический механизм и технологические особенности формирования структуры композиционных покрытий на основе нержавеющей стали 9X18 и бронзы ОЦС 5-8-6 для различных деталей, эксплуатирующихся в экстремальных условиях.

В связи с возрастающими требованиями современной промышленности в необходимости производства деталей, обладающих целым комплексом необходимых эксплуатационных свойств, перед исследователями возникает потребность в поиске и создании комплексных (гибридных) методов получения биметаллов. Поэтому создание технологий получения биметаллических и многослойных изделий с использованием новейших гибридных методов обработки имеют хорошую перспективу.

В развитие ранее разработанных технологий авторами данной работы предусмотрено [31–33] создание новых гибридных методов литейно-лазерной и литейно-плазменной обработки для получения биметаллических и многослойных изделий, что позволяет совместить преимущества использования концентрированных источников энергии с традиционными литейными технологиями производства и восстановления деталей машин (рис. 7).

Данные методы обработки основаны на принципе жидкофазного и жидко-твердофазного соединения с образованием диффузионного или металлургического связующего слоя. Сочетание традиционных приемов литейных технологий с воздействием концентрированных источников энергии позволяет получать соединения тонких пластин со слоями больших размеров в пределах одной технологической операции, а также соединение тугоплавкой основы с более легкоплавким рабочим или защитным слоем.

Метод позволяет получить значительные технические и экономические результаты, из которых наиболее важными являются: увеличение ресурса эксплуатации деталей машин в 2,5–6,0 раз, по сравнению с серий-

ными изделиями, и уменьшение до 70–80 % расходов высоколегированных дорогостоящих материалов.

В качестве объектов исследований выбраны такие композиции: сталь – чугун, сталь – бронза, сталь – алюминий и другие.

При получении биметаллических образцов большое внимание уделяли переходному слою, как наиболее важному элементу биметаллической конструкции. Для серого чугуна и стали переходной слой получался плотным по всей поверхности соединения, состоял из узкого слоя перлита со стороны чугуна и более широкого слоя перлита со стороны стали. Твердость серого чугуна марки СЧ30 в исходном состоянии составляла менее 20 HRC, а после заливки этого чугуна на поверхность стальной заготовки, его твердость повышалась до 30 HRC за счет интенсивного охлаждения. Для повышения свойств рабочего слоя производилось его упрочнение, которое приводило к повышению его твердости до 55 HRC.

Твердость исходного литого хромистого чугуна ЧХ16 составляла 49 HRC. После заливки расплава данного чугуна на заготовку из стали Ст3 происходило снижение его твердости до 40 HRC. После поверхностной закалки существенного повышения твердости залитого слоя хромистого чугуна ЧХ16 не происходило (41 HRC). Для повышения твердости рабочего слоя (хромистого чугуна) проведена объемная закалка, которая привела к повышению твердости до 60–62 HRC.

Соединение жидкой бронзы Бр05Ц5С5 с твердой заготовкой из стали Ст3 и получение биметаллических образцов происходило с получением плотных переходных слоев по всей линии контакта. Структура залитого слоя бронзы аналогична ее структуре в литом состоянии. Однако в процессе формирования биметаллической конструкции наблюдается диспергирование структурных составляющих вследствие повышенной скорости охлаждения металла.

Выводы

В работе показаны наиболее эффективные традиционные способы получения биметаллических и многослойных изделий. Отмечены их преимущества и недостатки.

Обозначены наиболее перспективные современные способы получения биметаллических изделий под действием концентрированных источников энергии.

В работе отмечают преимущества новейшего гибридного метода жидкофазного или жидко-твердофазного соединения разнородных материалов, который позволяет получать качественные биметаллические конструкции не только на основе железоуглеродистых сплавов (сталь – чугун), но и композиций черных и цветных сплавов (сталь – бронза).

Данный метод также позволяет производить биметаллические изделия поштучно и в непрерывном автоматизированном процессе, что определяет его технологическую гибкость для производства новых или восстановления изношенных деталей.

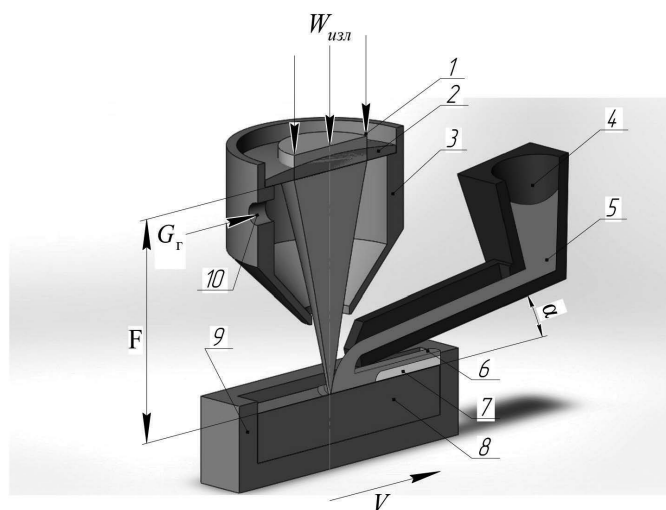
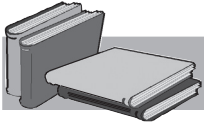


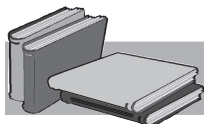
Рис. 7. Схема получения биметаллической конструкции под действием лазерного излучения [31]: 1 – лазерное или плазменное излучение; 2 – фокусирующий элемент; 3 – сопло; 4 – дозирующий лоток; 5 – расплав металла; 6 – слой затвердевающего расплава на поверхности детали; 7 – слой отлитого металла; 8 – заготовка; 9 – ограничители; 10 – отверстие подачи защитного газа



ЛИТЕРАТУРА

1. Скляр В.О. Инновационные и ресурсосберегающие технологии в металлургии. Учебное пособие. – Донецк: ДонНТУ, 2014. – 224 с.
2. Чепурко М.И., Остренко В.Я., Глускин Н.Я. и др. Биметаллические материалы – Л.: Судостроение, 1984. – 272 с.
3. Сиротенко Л.Д., Шлыков Е.С., Абляз Т.Р. Применение биметаллических материалов в машиностроении // (Эл. журнал) *Современные проблемы науки и образования*. – 2015. – № 2. – ч. 1.
4. Король В.К., Гиндельгорн М.С. Основы технологии производства многослойных металлов. – М.: Металлургия, 1970. – 237 с.
5. Вуков А. Bimetal production and applications // *Steel in Translation*. – 2011. – Vol. 41. – Iss. 9. – P. 778–786.
6. Литье биметаллических изделий / Сборник под ред. Снежко А.А. – Киев: ИПЛ АН УССР, 1976. – 122 с.
7. Состояние и перспективы развития биметаллического и многослойного литья / Сборник научных трудов под ред. Г.Д. Костенко. – Киев: ИПЛ АН УССР, 1991. – 126 с.
8. Wrobel T., Szajnar J. Bimetallic casting: ferritic stainless steel – grey cast iron // *Archives of metallurgy and materials*. – 2015. – Vol. 60. – Iss. 3. – pp. 2361–2365.
9. Yuanhu Yi-qing, Chen Lili Huan-dong, Huzi-ang Zhu. Microstructure and properties of Al/Cu bimetal in liquid–solid compound casting process // *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*. – June 2016. – Vol. 26. – Iss. 6. – P. 1555–1563.
10. Ширяев В.В., Пеликан О.А., Шинский И.О., Глушков Д.В., Романенко Ю.Н. Технологические особенности производства биметаллических (многослойных) отливок повышенной износостойкости // *Металл и литье Украины*. – 2009. – № 7-8. – С. 52–56.
11. Герасимов В.Г. Исследование и разработка технологии центробежного литья длинномерных биметаллических заготовок для пальцев гусеничных тракторов. Автореф. дисс. канд. тех. наук. – Киев: ВНИТИ и ИПЛ АН УССР, 1982. – 22 с.
12. Кривомазов В.А. Разработка и исследование системы автоматизации процесса литья биметаллических тел вращения центробежным способом. Автореф. дисс. канд. тех. наук. – Киев: ИПЛ АН УССР, 1967. – 26 с.
13. Nazari J., Yousefi M., Amiri Kerahroodi M.S., Bahrololoumi Mofrad N.S., Alavi Abhari S.H. Production of Copper-Aluminum Bimetal by Using Centrifugal Casting and Evaluation of Metal Interface // *International Journal of Materials Lifetime*. – 2015. – Vol. 1. – № 1. – P. 20–28.
14. Патон Б.Е. Избранные труды. – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, 2008. – 893 с.
15. Гринберг Б.А., Иванов М.А., Рыбин В.В. и др. Неоднородности поверхности раздела при сварке взрывом // *Физика металлов и металловедение*. – 2012. – т. 113. – № 2. – С. 187–200.
16. Малахов А.Ю., Сайков И.В., Первухин А.Б. Особенности сварки взрывом труб по «обратной» схеме // *Вестник Тамбовского университета*. – 2016. – т. 21. – вып. 3. – С. 1139–1140.
17. Zlobin B.S. Explosion Welding of Steel with Aluminum // *Combustion, Explosion and Shock Waves*. – May 2002. – Vol. 38. – Iss. 3. – P. 374–377.
18. Prazmowski M., Najwer M., Paul H., Andrzejewski D. Influence of explosive welding parameters on properties of bimetal Ti-carbon steel // *MATEC Web Conf. Volume 94, 2017, the 4th International Conference on Computing and Solutions in Manufacturing Engineering*. – 2016. – CoSME'16. – p. 8.
19. Шмидт М., Курынцев С.В. Получение биметаллических заготовок с помощью лазерной сварки проплавленным швом // *Автоматическая сварка*. – 2014. – № 4. – С. 47–51.
20. Наплавка. Технологии, материалы, оборудование / Составители: И.А. Рябцев, И.А. Кондратьев, Е.Ф. Переплетчиков, и др. – Киев: ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины, 2015. – 402 с.
21. Соснин Н.А., Ермаков С.А., Тополянский П.А. Плазменные технологии // *Руководство для инженеров*. – Санкт-Петербург: Изд-во Политехнического ун-та, 2013. – 406 с.
22. Бафаев Д.Х. Плазменная наплавка, упрочнение и выбор способа восстановления деталей машин // *Материалы VI Междунар. науч. конф.* – М.: Буки-Веди, 2016. – С. 65–68.
23. Carr M.L., Rigsbee J.M. Laser processing of plasma-sprayed coatings // *Materials science and Engineering*. – 1984. – Vol. 62. – № 1. – P. 49–56.
24. Блинков И.В., Орехов И.Е. Формирование лазерной наплавкой композиционных материалов и их трибологические свойства // *Изв. Вузов. Черная металлургия*. – № 1. – 1996.
25. Одинов Н.Н., Штернин Л.А. Повышение производительности и расширение возможностей лазерной наплавки // *Свар. пр-во*. – 1987. – № 2. – С. 1–4.
26. Коваленко В.С., Головки Л.Ф. Упрочнение и легирование деталей машин лучом лазера. – К.: Техніка, 1990. – 191 с.
27. Шатрава А.П. Управление формированием антифрикционных наплавочных слоев из композиционных материалов на основе Fe-Cu при действии лазерного излучения. Автореф. дисс. канд. тех. наук. – Киев: НТУУ КПИ, 2001. – 20 с.
28. Шатрава А.П. Физико-механические характеристики композиционных лазерных покрытий Тез. докл. на конф. мол. ученых и специалистов. – «ЗСТ», 2001 г.
29. Шатрава А.П. Физико-механические характеристики покрытий сталь-бронза, полученных с помощью лазерной наплавки // *Автоматическая сварка*. – 2002. – № 5. – С. 60–61.
30. Найдек В.Л., Лихошва В.П., Шатрава А.П. Триботехнические композиционные покрытия, полученные методом лазерной газопорошковой наплавки // Тез. докл. на между. науч.-тех. конгрессе «Литейное производство в новом веке...». – Киев, 2002 г.
31. Лихошва В.П., Шатрава А.П. Литейно-лазерное жидкофазное соединение разнородных материалов // Тез. докл. на VI междунар. науч.-практ. конф. «Металлургия-2017», Запорожье, 2017. – С. 164–165.
32. Лихошва В.П., Шматко О.В. Безперервний ливарно-плазмовий метод отримання біметалевих та багат шарових конструкцій // Тез. докл. на VI междунар. науч.-практ. конф. «Металлургия-2017», Запорожье, 2017. – С. 165–166.
33. Лихошва В.П., Надашкевич Р.С. Новий прогресивний метод отримання біметалевих і багат шарових виробів // Тез. докл. на VI междунар. науч.-практ. конф. «Металлургия-2017», Запорожье, 2017. – С. 166–168.

Поступила 18.10.2018



REFERENCES

1. Skliar, V.O. (2014). Innovative and resource-saving technologies in metallurgy: textbook. Donetsk: DonNTU, 224 p. [in Russian].
2. Chepurko, M.I., Ostrenko, V.Ya., Gluskin, N.Ya. et al. (1984). Bimetallic materials. L.: Shipbuilding, 272 p. [in Russian].
3. Sirotenko, L.D., Shlykov, E.S., Abliaz, T.R. (2015). The use of bimetallic materials in mechanical engineering. (El. magazine) *Modern problems of science and education*, no. 2, part. 1 [in Russian].
4. Korol', V.K., Hindelgom, M.S. (1970). Fundamentals of production technology of multilayer metals. Moscow.: Metallurgiya, 237 p. [in Russian].
5. Bykov, A. (2011). Bimetal production and applications. *Steel in Translation*, Vol. 41, Iss. 9, pp. 778–786 [in English].
6. Snezhko, A.A. (Ed.) (1976). Casting bimetallic products. Kiev: IPL AS USSR, 122 p. [in Russian].
7. Kostenko, G.D. (Ed.) (1991). The state and prospects of development of bimetallic and multilayer casting. Collection of scientific papers. Kiev: IPL AS USSR, 126 p. [in Russian].
8. Wrobel, T., Szajnar, J. (2015). Bimetallic casting: ferritic stainless steel – gray cast iron. *Archives of metallurgy and materials*. Vol. 60, Iss. 3. pp. 2361–2365 [in English].
9. Yuanhu Yi-qing, Chengang Huang-dong, Huzi-ang Zhu (2016). Microstructure and properties of Al/Cu bimetal in liquid–solid compound casting process. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, June 2016, Vol. 26, Iss. 6, pp. 1555–1563 [in English].
10. Shiryayev, V.V., Pelikan, O.A., Shinsky, I.O., Glushkov, D.V., Romanenko, Yu.N. (2009). Technological features of the production of bimetallic (multilayer) castings with increased wear resistance. *Metall i lit'e Ukrainy*, no. 7-8, pp. 52–56 [in Russian].
11. Gerasimov, V.G. (1982). Research and development of centrifugal casting technology for long bimetallic billets for tracked tractor fingers. Extended abstract of candidate's thesis. Kiev: VNITI and IPL AS USSR, 22 p. [in Russian].
12. Krivomazov, V.A. (1967). Development and research of the automation system for the casting process of bimetallic rotation bodies by centrifugal method. Extended abstract of candidate's thesis. Kiev: IPL AS USSR, 26 p. [in Russian].
13. Nazari, J., Yousefi, M., Amiri Kerahroodi, M.S., Bahrololoumi Mofrad, N.S., Alami Abhari, S.H. (2015). Production of Copper-Aluminum Bimetal Copper-Metal Casting-on-Metal-Casting. *International Journal of Materials Lifetime*, Vol. 1, no. 1, pp. 20–28 [in English].
14. Paton, B.E. (2008). Selected Works. Kiev: IES im. E.O. Paton of NAS of Ukraine, 893 p. [in Russian].
15. Grinberg, B.A., Ivanov, M.A., Rybin, V.V. et al. (2012). Heterogeneity of the interface during explosion welding. *Physics of Metals and Metal Science*, Vol. 113, no. 2, pp. 187–200 [in Russian].
16. Malakhov, A.Yu., Saikov, I.V., Pervukhin, A.B. (2016). Peculiarities of explosion welding of pipes according to the “reverse” scheme, *Vestnik of Tambov University*, Vol. 21, no. 3. pp. 1139–1140 [in Russian].
17. Zlobin, B.S. (2002). Explosion of Steel with Aluminum. *Combustion, Explosion and Shock Waves*, May 2002, Vol. 38, Iss. 3, pp. 374–377 [in English].
18. Prazmowski, M., Najwer, M., Paul, H., Andrzejewski, D. (2016). Influence of Ti-carbon steel. MATEC Web Conf. Vol. 94, 2017, the 4th International Conference on Computing and Solutions in Manufacturing Engineering, CoSME'16, p. 8 [in English].
19. Schmidt, M., Kuryntsev, S.V. (2014). Production of bimetallic billets using laser welding with a weld seam. *Automatic welding*, no. 4, pp. 47–51 [in Russian].
20. Riabtsev, I.A., Kondrat'ev, I.A., Perepletchikov, E.F. (2015). Surfacing. Technologies, materials, equipment. Kiev: IES im. E.O. Patona of NAS of Ukraine, 402 p. [in Russian].
21. Sosnin, N.A., Ermakov, S.A., Topolyansky, P.A. (2013). Plasma Technologies. *Manual for Engineers*. St. Petersburg: Publishing House of the Polytechnic University, 406 p. [in Russian].
22. Bafaev, D.Kh. (2016). Plasma surfacing, hardening and the choice of the method of restoration of machine parts. Materials of the VI Intern. scientific conf. Moscow: Buki-Vedi, pp. 65–68 [in Russian].
23. Capp, M.L., Rigsbee, J.M. (1984). Laser processing of plasma-sprayed coatings. *Materials science and Engineering*, Vol. 62, no. 1, pp. 49–56 [in English].
24. Blinkov, I.V., Orekhov, I.E. (1996). Formation of composite materials by laser surfacing and their tribological properties. *Izv. Vuzov. Chernaia metallurgiya*, no. 1 [in Russian].
25. Odintsov, N.N., Shternin, L.A. (1987). Increasing productivity and expanding the possibilities of laser surfacing, *Svar. pr-vo*, no. 2, pp. 1–4 [in Russian].
26. Kovalenko, V.S., Golovko, L.F. (1990). Hardening and doping of machine parts with a laser beam. Kyiv: Tekhnika, 191 p. [in Russian].
27. Shatrava, A.P. (2001). Controlling the formation of anti-friction cladding layers of composite materials based on Fe-Cu under the action of laser radiation. Extended abstract of candidate's thesis. Kiev: NTUU KPI, 20 p. [in Russian].
28. Shatrava, A.P. (2001). Physico-mechanical characteristics of composite laser coatings. Tez. report at conf. of young scientists and specialists. FTA, 2001 [in Russian].
29. Shatrava, A.P. (2002). Physico-mechanical characteristics of steel-bronze coatings obtained using laser surfacing. *Automatic welding*, no. 5, pp. 60–61 [in Russian].
30. Naydek, V.L., Likhoshva, V.P., Shatrava, A.P. (2002). Tribotechnical composite coatings obtained by laser gas-powder surfacing. Proc. report on the int. scientific-tech. congress “Foundry production in the new century...”. Kiev, 2002 [in Russian].
31. Likhoshva, V.P., Shatrava, A.P. (2017). Foundry-laser liquid-phase compound of dissimilar materials. Proc. report at the VI Intern. scientific and practical conf. “Metallurgy-2017”, Zaporozhye, pp. 164–165 [in Russian].
32. Likhoshva, V.P., Shmatko, O.V. (2017). Continuous casting-plasma method of obtaining bimetallic and multilayer structures. Proc. report at the VI Intern. scientific and practical conf. “Metallurgy-2017”, Zaporozhye, pp. 165–166 [in Ukrainian].
33. Likhoshva, V.P., Nadashkevich, R.S. (2017). New progressive method of obtaining bimetallic and multilayer products. Proc. report at the VI Intern. scientific and practical conf. “Metallurgy-2017”, Zaporozhye, pp. 166–168 [in Ukrainian].

Received 18.10.2018

Анотація

В.П. Лихошва, д-р техн. наук, проф., зав. відділу; **О.П. Шатрава**, канд. техн. наук, ст. наук. співр., e-mail: shatrava@ptima.kiev.ua; **О.А. Пелікан**, наук. співробітник

*Фізико-технологічний інститут металів і сплавів НАН України,
м. Київ, Україна*

Сучасні способи виробництва біметалевих виробів

У статті наведено історію і результати виробництва та застосування біметалевих матеріалів з часу їх винаходу по сьогоднішній день. Наведено основні технологічні параметри і результати різних методів їх отримання – традиційних, таких як пресування, лиття, прокатка, зварювання вибухом та ін. і сучасних – зварювання, наплавлення, напилення та ін. У статті показано, що застосування біметалевих виробів набуває все більшого поширення при виробництві та відновленні зношених деталей в хімічній, нафтохімічній, харчовій та машинобудівній промисловості завдяки отриманню унікальних комплексів властивостей: високої міцності, жароміцності, корозійної стійкості, електропровідності і теплопровідності, технологічності та ін.

Також в статті показано участь вчених і фахівців ФТІМС НАН України в розробці традиційних ливарних методів отримання біметалів, а також запропоновано підходи до створення нових гібридних методів ливарно-лазерної обробки для отримання біметалевих та багатошарових виробів, що дозволяє поєднати переваги використання концентрованих джерел енергії з традиційними ливарними технологіями виробництва і відновлення деталей машин.

Ключові слова

Біметалеві конструкції, класифікація біметалів, прокатка, відцентрове лиття, зварювання вибухом, лазерне наплавлення, ливарно-лазерна обробка.

Summary

V.P. Likhoshva, Doctor of Engineering Sciences, Prof., Head of Department; **A.P. Shatrava**, Candidate of Engineering Sciences, Senior Researcher, e-mail: shatrava@ptima.kiev.ua; **O.A. Pelikan**, Researcher

Physico-technological Institute of Metals and Alloys of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine

Modern methods of manufacturing bimetallic products

The article gives the history and results of production and application of bimetallic materials from the time of their invention to the present day. The main technological parameters and results of various methods for their production are given, such as pressing, casting, rolling, explosion welding, and modern ones – welding, surfacing, sputtering, etc.

The article shows that the use of bimetallic products is becoming more common in the production and recovery of worn parts in the chemical, petrochemical, food and industrial engineering industries by obtaining unique properties: high corrosion resistance, strength, heat resistance, corrosion resistance, electrical conductivity and thermal conductivity, etc.

The article also shows the participation of scientists and specialists from the PTIMA of NAS of Ukraine in the development of traditional foundry methods for obtaining bimetals, as well as approaches to the development of new hybrid methods of foundry-laser processing to produce bimetallic and multilayered products, which allows to combine the advantages of using concentrated sources energy with traditional foundry technologies for the production and restoration of machine parts.

Keywords

Bimetallic structures, bimetal classification, rolling, centrifugal casting, explosion welding, laser cladding, casting-laser processing.