



УДК 669.187.56.001.7

О ПЕРСПЕКТИВАХ ПРОИЗВОДСТВА БИМЕТАЛЛА С ПРИМЕНЕНИЕМ ЭЛЕКТРОШЛАКОВОГО ПРОЦЕССА

Б. Е. Патон, Л. Б. Медовар, В. Я. Саенко

Показана роль электрошлакового сварочного процесса в получении биметаллических слитков для производства листового и сортового проката. Рассмотрены особенности производства биметаллических сортовых полуфабрикатов путем прокатки на сортопрокатных станах квадратных двухслойных слитков, полученных методом литого плакирования с использованием сердечников различной формы, а также путем прокатки и горячего прессования составных круглых двухслойных заготовок. Оценены возможности использования электрошлакового процесса с жидким металлом в производстве биметаллических слитков на печах ЭШП, в том числе методом непрерывного электрошлакового литья.

The role of electroslag welding process in producing bimetals ingots for manufacturing of sheets and rolled sections is shown. Specifics of manufacture of bimetals section semi-products by rolling in section mills of square two-layer ingots, produced by the method of cladding by casting using mandrels of different shapes, and also by rolling and hot pressing of composite round two-layers billets, is considered. The feasibility of use of the electroslag process with a liquid metal in the production of bimetals ingots in ESR furnaces, including also the method of a continuous electroslag casting, is evaluated.

Ключевые слова: биметаллические слитки; биметаллические листы; биметаллический сортовой прокат; электрошлаковый сварочный процесс; электрошлаковый переплав; электрошлаковая наплавка; электрошлаковая наплавка жидким металлом

Необходимо признать, что, несмотря на более чем столетнюю историю промышленного производства и применения различных видов биметаллов, а также многообразие известных методов их получения, они до сих пор не заняли достойного места в ряду важнейших конструкционных материалов. Доля биметаллов, особенно сортового биметалла, в общем производстве конструкционных материалов все еще остается незначительной, хотя в ряде случаев благодаря их уникальным служебным свойствам они практически не имеют альтернативы. В работе [1] отмечается, что одной из основных причин такого положения является их высокая стоимость, которая обусловлена специфическими особенностями применяемых для их изготовления тех или иных технологических процессов. Со своей стороны отметим, что еще одним сдерживающим фактором широкого использования в промышленности биметаллов является не всегда высокое и стабильное качество, гарантирующее отсутствие расслоений в процессе изготовления биметаллических изделий и их эксплуатации.

При производстве биметаллических полуфабрикатов (листов, сортового проката, труб, различного рода профильного проката и т. п.) были опробованы самые различные технологические процессы, привлечены практически все методы обработки давлением, литейные технологии, электродуговая и электрошлаковая наплавка, сварка взрывом, электронно-лучевая технология, электрохимические способы, плазменное и другие способы напыления.

Особое место среди многочисленных технологий получения различных видов биметаллов и биметаллических изделий занимают методы, основанные на электрошлаковом сварочном процессе, применение которого обеспечивает надежное соединение плакирующего и основного слоев еще до прокатки биметаллической заготовки. Впервые в мировой практике идея использования электрошлакового сварочного процесса при получении крупных биметаллических заготовок с коррозионностойким плакирующим слоем, предназначенных для прокатки на биметаллические листы, была предложена в Институте электросварки им. Е. О. Патона еще в конце 50-х гг. [2, 3]. На основе биметалла, полученного этим методом, на Мариупольском заводе тяжелого машиностроения в 60-е гг. впервые в нашей стране было организовано промышленное производство толсто-стенных (36... 170 мм) штампосварных биметаллических сосудов высокого давления для различных

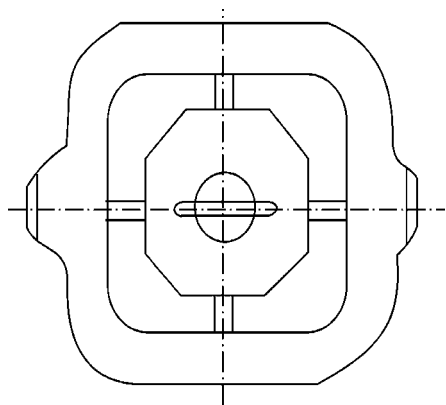


Рис. 1. Схема установки восьмигранного стержня в изложнице перед заливкой металла

отраслей народного хозяйства [4–6]. В СССР одним из главных потребителей толстолистового биметалла было нефтехимическое и атомное энергетическое машиностроение, а также судостроение [7, 8].

В конце 80-х — середине 90-х гг. работы по промышленному освоению производства биметаллических листов методами, основанными на применении электрошлакового процесса (электрошлаковой наплавки (ЭШН) в наклонном положении [9], электрошлаковой наплавки на печах ЭШП [10] и других технологий), получили дальнейшее развитие благодаря новым задачам, которые появились в судостроении. Для обшивки корпусов строящихся атомных ледоколов потребовались биметаллические листы, сочетающие высокую прочность корпусной стали с высокой коррозионно-эрозионной стойкостью и надежностью покрытия. В результате проведенных работ на основе метода ЭШН в наклонном положении были получены промышленные биметаллические листы с основным слоем из стали 12ХН2МД и плакирующим слоем из коррозионно-стойкой стали, которые прошли натурные испытания в составе обшивки корпусов атомных ледоколов. Результаты этих испытаний послужили основанием для строительства из двухслойной стали всего ледового пояса атомного ледокола «Урал» [11]. Эффективным также оказалось применение высокопрочной двух- и трехслойной листовой стали марок АБ2П и АБ2Т толщиной 20... 60 мм с основным слоем из стали 09ХН3МД и плакирующим слоем из стали 08Х18Н10Б для строительства морских сооружений, в частности, морских ледостойких платформ. При этом сопротивление срезу плакирующего слоя биметалла, полученного с применением ЭШН, составило $> 300 \text{ Н/м}^2$ по всей площади изготовленных биметаллических листов [12].

В судостроении так же давно [7] используются круглые биметаллические сортовые заготовки, в частности, для изготовления гребных валов скоростных судов, которые трудно защитить от коррозии обычными методами (например, обрешиванием). Сортовой биметаллический прокат диаметром 90, 130 и 140 мм с сердцевинной из высокопрочной конструкционной стали и плакирующим слоем из нержавеющей стали 1Х18Н9Т для гребных валов впервые в СССР был получен в 1955 г. на Кузнецком металлургическом комбинате (КМК) по технологии, разработанной совместно с ЦНИИ КМ

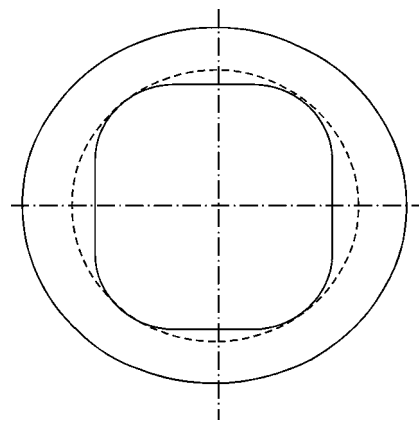


Рис. 2. Форма сердцевины в катаной биметаллической заготовке диаметром 90 мм при применении восьмигранного стержня в двухслойном слитке

«Прометей» [13]. В основу технологического процесса был положен метод литого плакирования, который применялся на КМК в промышленном производстве листового биметаллического проката.

Главная задача при разработке и освоении технологии производства биметаллического сортового проката заключалась в изыскании оптимальных размеров и формы стержня в двухслойном слитке, а также режимов деформации двухслойного слитка на блюминге и двухслойной заготовки на сортовом стане с целью получения в готовом биметаллическом прокате сердцевины, приближающейся по форме к кругу заданного диаметра.

Двухслойные слитки отливали сифонным способом в квадратные 6-тонные чугунные изложницы и после разведения передавали горячим всадом в нагревательные колодцы блюминга. Нагретые до 1270... 1280 °С слитки прокатывали на дуореверсивном стане 1100 на сечение 310×320 мм, затем на дуореверсивном стане 900 на сечение 180×180 и 210×210 мм и, наконец, на среднесортном стане — на круги диаметром 90 и 130... 140 мм соответственно. Для получения круглой сердцевины испытывали два вида стержней: круглого сечения и восьмигранный (квадратный) со срезанными углами (рис. 1).

В результате экспериментальных работ установлено, что процентное отношение площади сечения сердцевины к общей площади сечения в слитке, заготовке и конечном профиле приблизительно равны. Однако по своей форме сердцевина может существенно отличаться от круга заданного диаметра в силу того, что при прокатке деформация биметаллической заготовки производится лишь в двух взаимно перпендикулярных направлениях. Даже при правильно подобранной сердцевине в слитке изменение ее формы может не соответствовать изменению формы слитка вследствие различной степени деформации по сторонам деформируемого раската. Наиболее приемлемая форма сердцевины достигается при максимально возможной и равномерной деформации по сторонам слитка. Поэтому рекомендуемые схемы прокатки биметаллических слитков предусматривают максимальные разовые и одинаковые суммарные обжатия от кантовки до кантовки.

Оптимальную форму сердцевины в круглой катаной биметаллической заготовке получили при ис-

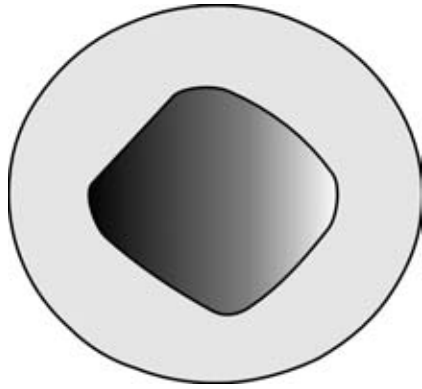


Рис. 3. Форма сердцевины в катаной биметаллической заготовке диаметром 90 мм при применении стержня круглого сечения в двухслойном слитке

пользовании восьмигранного стержня. Как показано на рис. 2, сердцевина в круглом сортовом прокате расположена концентрично наружной поверхности и имеет почти правильную форму восьмигранника с закругленными углами. В случае применения стержней круглой формы после прокатки на обжимных станах 1100 и 900 по ранее разработанным режимам получили квадратную заготовку сечением 180×180 мм с сердцевиной в виде овала, а после прокатки на готовый профиль (круг диаметром 90 мм) получили сердцевину в виде квадрата-ромба (рис. 3), т. е. по геометрии сердцевины полученная биметаллическая сортовая заготовка не отвечала поставленным требованиям.

Учитывая отмеченные сложности производства биметаллического сортового проката, авторы изобретения [14] предлагают горячую прокатку на сортопрокатных станах круглых биметаллических заготовок первоначально осуществлять по схеме овал-квадрат в вертикальных клетях, а окончательное формирование — путем прокатки по схеме круг-круг в многовалковых калибрах. На рис. 4 показана предлагаемая схема прокатки биметаллических прутков круглого сечения с использованием трехвалковых калибров.

По этой технологии для прокатки используют двухслойную цилиндрическую заготовку, состоящую из сердечника и оболочки. Торцы собранной заготовки заваривают по контуру. Нагретую до температуры прокатки заготовку прокатывают первоначально в нескольких черновых клетях с трехвалковыми калибрами (позиции 1–3) по системе круг-круг. При прокатке в трехвалковых калибрах, замкнутого практически по всему контуру, без уширения металла происходит всестороннее равномерное сжатие двухслойной заготовки, что обеспечивает надежное сцепление металлов сердечника и оболочки по всей контактной поверхности и равномерную толщину плакирующего слоя в биметаллическом прокате. Количество черновых пропусков в трехвалковых калибрах определяется суммарной величиной критического обжатия, необходимой для обеспечения надежного сцепления слоев в биметаллическом прутке и, в свою очередь, зависящей от физико-химических характеристик металла основного и плакирующего слоев. Из-за сравнительно малой вытяжной способности системы калибров круг-круг прокатка в многовалковых калибрах для получения готовой продукции становится непросто-

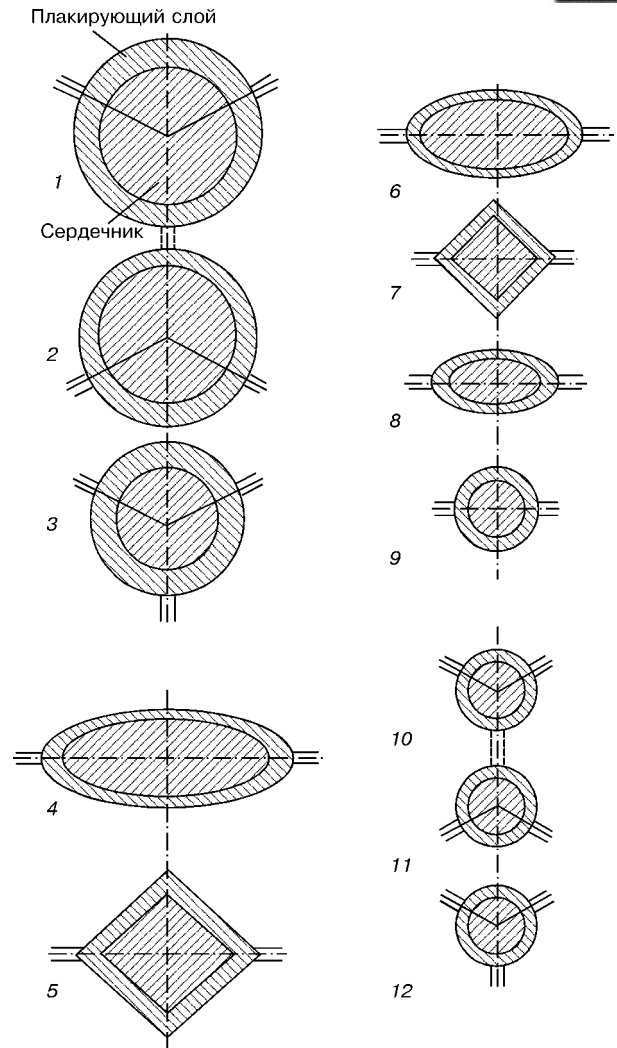


Рис. 4. Прокатка биметаллических прутков круглого сечения с использованием трехвалковых калибров по схеме круг-круг (1–3), овал-квадрат (4–9), круг-круг (10–12)

дательной. Поэтому дальнейшее деформирование металла производится в двухвалковых калибрах (позиции 4–9) по одной из известных схем, например, с применением системы калибров овал-квадрат. С целью получения точных геометрических размеров окончательное формирование готового биметаллического прутка после осуществления необходимой вытяжки вновь производится в трехвалковых калибрах (позиции 10–12) по системе круг-круг. Использование клетей с трехвалковыми калибрами для горячей калибровки круглого биметаллического прутка позволяет, по мнению авторов [14], обеспечить точность размеров готового проката, соответствующую точности холоднотянутых профилей.

Однако, как следует из недавней работы [15], проблема получения биметаллических прутков с заданной равномерной толщиной плакирующего слоя с применением прокатки в калибрах остается актуальной. Для ее решения авторы указанной работы применяют трехмерное компьютерное моделирование, которое подкрепляется результатами экспериментальных исследований особенностей прокатки модельных биметаллических образцов (сталь 55 + медь М1-Е) с разной исходной толщиной плакирующего слоя. Прокатке подвергали биметаллические цилиндрические заготовки диаметром 21,7 мм, слой



Рис. 5. Биметаллический слиток диаметром 350 мм после электрошлаковой наплавки методом ЭШП ЖМ коррозионностойкого аустенитного слоя толщиной 35 мм

которых перед прокаткой сваривали методом взрыва. Толщина плакирующего слоя (меди) составляла 0,85; 1,80 и 2,85 мм в исходных образцах, которые подвергали горячей прокатке на прутки диаметром 14 мм.

Известно, что горячее прессование по сравнению с прокаткой обеспечивает более благоприятную схему напряженного состояния. При прессовании круглых профилей деформация осесимметрична, в результате искажение формы круглого сердечника отсутствует. В процессе горячего прессования цилиндрических составных двухслойных заготовок, как и при прокатке двухслойных пакетов, сцепление слоев происходит под действием совместной пластической деформации, причем, в отличие от прокатки одновременно по всему контуру при равномерном распределении радиальных сжимающих напряжений в очаге деформации. Это способствует тому, что при прессовании форма сердечника практически не искажается. Вместе с тем, при горячем прессовании сплошных профилей круглого и фасонного сечения процесс пластического течения сопровождается неравномерной деформацией металла по сечению очага матрицы, в результате чего внутренние слои металла заготовки текут быстрее и опережают наружные. Установлено [16], что при прессовании биметаллических профилей неравномерность деформации по сечению профиля и характер распределения плакирующего слоя по длине прежде всего зависят от разнопрочности металлов сердечника и плакировки. Это влияние по сравнению с прессованием сплошных профилей становится тем значительнее, чем больше разброс значений прочностных характеристик металлов сердечника и плакировки, и особенно усугубляется в случае, если в начальный период между ними отсутствует прочное сцепление, что резко нарушает начальное соотношение площадей сердечника и плакировки.

Таким образом, при получении биметаллических сортовых полуфабрикатов как деформированием круглых биметаллических заготовок на сортопрокатных станах, так и горячим прессованием одним из ключевых вопросов является наличие (или отсутствие) начального гарантированного сцепления между разнородными слоями исходной двухслойной заготовки. Если между сердечником и оболочкой двухслойной заготовки еще до горячей деформации обеспечено неразъемное соединение слоев по всей контактной поверхности, схему прокатки такой заготовки можно существенно упростить. Это особенно важно учитывать при производстве профильного проката.

Благодаря разработке в ИЭС им. Е. О. Патона электрошлакового процесса с жидким металлом (ЭШП ЖМ) открываются новые возможности для совершенствования технологии получения биметаллических заготовок [17, 18], причем, не только применительно к производству листового биметалла, где эффективность ЭШП ЖМ не вызывает сомнений, но и сортового биметалла арматурного профиля. Как уже отмечалось в [19], ЭШП ЖМ позволяет реализовать непрерывный электрошлаковый процесс с жидким металлом. Выполненные исследования [20, 21] показали, что применение ЭШП ЖМ обеспечивает наплавку плакирующего слоя с минимальной глубиной проплавления основного слоя заготовки как по сечению, так и по высоте. При необходимости наплавка этим способом может производиться и по схеме сваркопайки, т. е. практически без гарантированного проплавления основного металла. В этом случае в результате обработки контактной поверхности основной заготовки жидким синтетическим шлаком происходит ее очищение от окислов и других загрязнений, а при достижении определенной температуры — смачивание заливаемым в зазор кристаллизатора металлическим расплавом, образующим плакирующий слой. Это, как известно, является обязательным условием для протекания процесса пайки-наплавки.

Важным преимуществом ЭШП ЖМ в производстве биметаллических заготовок для листового и сортового проката является возможность использования для его реализации действующих печей ЭШП, разумеется, после соответствующей модернизации. Для этого печи ЭШП дополнительно оснащаются токоподводящими короткими кристаллизаторами для электрошлаковой наплавки и устройствами для накопления жидкого металла и дозированной подачи его в зону формирования плакирующего слоя.

На рис. 5 представлен общий вид биметаллической заготовки диаметром 350 мм после электрошлаковой наплавки методом ЭШП ЖМ коррозионностойкого аустенитного слоя толщиной 35 мм на печи ЭШП. Проведенные исследования металла плакирующего слоя биметаллической заготовки показали, что распределение основных химических элементов по сечению и длине заготовки практически равномерное и соответствует техническим требованиям.

Следует отметить, что еще в середине 60-х гг. прошлого столетия в ИЭС им. Е. О. Патона был предложен способ и конструкция кристаллизатора для получения биметаллических заготовок. Однако



эти предложения не нашли тогда промышленного применения, т. к. не удалось преодолеть главную трудность — большое и неравномерное проплавление основного металла в процессе изготовления биметаллических заготовок ЭШП, что неизбежно приводило к нежелательному разбавлению углеродистой сталью металла плакирующего слоя и недопустимому колебанию его химического состава даже в пределах одного листа. Если судить по опубликованным материалам, эта проблема остается актуальной до сих пор в случае применения канонического ЭШП.

Мы полагаем, что опыт получения биметаллов ЭШП ЖМ — это шаг к реализации полунепрерывного, а в будущем, возможно, и непрерывного литья. Для прокатки широкоформатных биметаллических листов по-прежнему нужно будет использовать стандартные прокатные станы, а катать биметаллическую полосу, особенно сортовой прокат, необходимо на планетарных станах, соединяя преимущества прокатки и прессования.

В целом же, круг вопросов, связанных с производством и применением биметаллов, значительно шире задач получения надежного соединения разнородных материалов и снижения стоимости продукции путем экономии дорогостоящих легирующих металлов. По нашему мнению, сегодняшние биметаллы — это прообраз конструкционных сталей и сплавов массового производства в будущем, с заданной анизотропией структуры и свойств, названных нами ранее ЗАС-материалами нового класса [22, 23]. Здесь авторы не могут отказать себе в удовольствии (в надежде разделить его с читателем) и приводят в качестве иллюстрации особых свойств биметаллов, ЗАС-сталей, хорошо известный рисунок из книги Г. И. Погодина-Алексеева* (рис. 6).

В заключение отметим, что в океане стали, грозящем вместить в 2004 г. более одного миллиарда тонн, легированные стали составляют всего 7...8%, а доля высоколегированных сталей едва ли достигает 1%. Для того, чтобы промышленное производство биметаллов заняло достойное место, необходимо развивать и применять новейшие технологии получения биметаллических материалов с использованием ЭШП, отвечающие требованиям нового века.

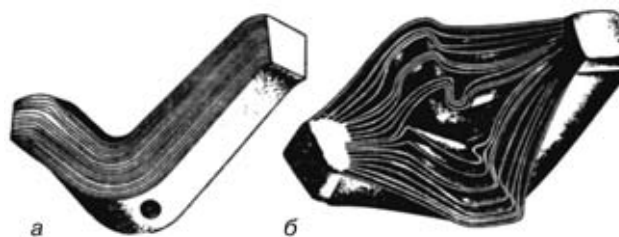


Рис. 6. Поведение многослойного образца после испытания на ударный изгиб при расположении плоскости слоев перпендикулярно (а) и параллельно (б) направлению удара

1. Кузнецов Е. В. Основные тенденции в развитии процессов производства слоистых металлических композиций // Труды 3-го конгресса прокатчиков, Липецк, 19–20 окт. 1999 г. — М., 2000. — С. 235–237.
2. А. с. 129473 СССР. Способ производства биметаллического листа на основе электрошлаковой сварки / Б. Е. Патон, Б. И. Медовар, В. А. Луцюк-Худин и др. — Заявл. 09.11.59. Оpubл. 1980.
3. Патон Б. Е., Медовар Б. И., Луцюк-Худин В. А. Производство двухслойных листов с применением электрошлаковой сварки // Бюлл. ЦНИИЧМ. — 1962. — № 6. — С. 15–21.
4. Производство толстостенных сварных сосудов из двухслойной стали с коррозионностойкой аустенитной облицовкой / Б. И. Медовар, В. А. Луцюк-Худин, В. Я. Саенко и др. // Производство, сварка и применение двухслойной стали. — М.: ГОСИНТИ, 1963. — С. 17–28.
5. 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.
6. Перспективы производства сварных толстостенных биметаллических корпусов сосудов высокого давления / Б. Е. Патон, А. Д. Чепурной, В. Я. Саенко, Л. Б. Медовар // Автомат. сварка. — 2004. — № 1. — С. 30–39.

7. Судостроительная сталь / А. М. Вейнгартен, В. А. Делле, А. В. Носкин, Н. Н. Соколов и др. — Л.: Судпромгиз, 1962. — 304 с.
8. Многослойная сталь в сварных конструкциях / Под ред. Б. Е. Патона и Б. И. Медовара. — Киев: Наук. думка, 1984. — 288 с.
9. Разработка технологии электрошлаковой наплавки в производстве биметаллических листов / А. В. Попов, В. И. Шейко, Е. Д. Кудинов и др. // Тяж. машиностр. — 1994. — № 1. — С. 29–30.
10. Опыт разработки технологии производства коррозионно-стойких биметаллических заготовок с использованием электрошлакового передела / А. А. Шараров, И. Г. Родионова, В. И. Пузачев и др. // Сталь. — 1996. — № 12. — С. 27–29.
11. Соколов О. Г., Малышевский В. А., Легостаев Ю. Л. Современные свариваемые судостроительные стали в России и за рубежом // Свароч. пр-во. — 1995. — № 5. — С. 19–21.
12. Легостаев Ю. Л., Мотовилина Г. Д., Семичева Т. Г. Особенности структуры высокопрочной плакированной стали // Вопросы материаловедения. — 1998. — 13, № 2. — С. 5.
13. Кобзев В. К. Производство круглой заготовки, плакированной нержавеющей сталью 1X18H10T // Производство, сварка и применение двухслойной стали. — М.: ГОСИНТИ, 1963. — С. 32–36.
14. А. с. 709308 СССР. Способ изготовления многослойных прутков / Ф. Е. Долженков, Ф. А. Писаренко, Ю. Т. Шевченко, Г. А. Гладков // Открытия. Изобретения. — 1980. — № 2.
15. Dyja H., Mroz S., Milenin A. et al. / Experimental investigation and 3D FEM-simulation of the process of rolling of bimetallic rods // Proc. of 44th Mechanical Working and Steel Processing, 8th Int. Rolling Conf. and Int. Symp. on Zinc-Coated Steels, Orlando, Florida, Sept. 8–11, 2002. — Vol. XL.
16. Чернов А. Н., Голованенко С. А., Гуляев В. В. Особенности изготовления биметаллических профилей методом горячего прессования // Производство биметаллов: Сб. трудов ЦНИИЧМ. — М.: Металлургия, 1965. — Вып. 42. — С. 92–100.
17. Electroslag processes used in production of clad steel / В. Я. Медовар, V. Ja. Saenko, L. B. Medovar // The Paton Welding J. — 1999. — Pilot issue. — July. — P. 71–74.
18. Медовар Б. И., Саенко В. Я., Медовар Л. Б. Получение заготовок коррозионностойкого биметалла методом электрошлаковой наплавки // Probl. спец. электрометаллургии. — 2000. — № 2. — С. 3–11.
19. Патон Б. Е., Медовар Л. Б., Саенко В. Я. Повышение эффективности производства металла ЭШП // Там же. — 2002. — № 3. — С. 3–9.
20. Патон Б. Е., Медовар Л. Б., Саенко В. Я. Новые возможности электрошлаковых технологий в машиностроении // Металлургия машиностроения. — 2003. — № 1. — С. 2–5.
21. Электрошлаковая технология в производстве биметаллических изделий / Б. Е. Патон, Л. Б. Медовар, В. Е. Шевченко, В. Я. Саенко и др. // Probl. спец. электрометаллургии. — 2004. — № 2. — С. 3–11.
22. Патон Б. Е., Медовар Л. Б. О новом классе металлических материалов // Докл. АН УССР. Сер. А. — 1980. — № 9. — С. 100–102.
23. Сталь с заданной анизотропией структуры — ЗАС / Саенко В. Я., Медовар Л. Б., Ус В. И. и др. // Проблемы сварки и специальной электрометаллургии. — Киев: Наук. думка, 1990. — С. 264–269.

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

Поступила 01.11.2004

* Погодин-Алексеев Г. И. Динамическая прочность и хрупкость металлов. — М.: Машиностроение, 1965. — 234 с.