

УДК 621.763

URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/metmat/mstp/1046.html>

ОБЗОР МЕТОДОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

М.А. Янко

yanko@bmstu.ru

SPIN-код: 9107-056

А.В. Девятченко

devyatchenokav@student.bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Выполнен обзор основных методов изготовления биметаллических материалов в современном промышленном производстве. Представлена и изучена группа биметаллов по области их применения. Также подробно рассказано про основные методы получения биметаллов: комбинированное литье, пакетная прокатка, плакирование взрывом, холодная сварка прокаткой, прессование биметаллов, волочение. Проведен сравнительный анализ достоинств и недостатков. В качестве перспективных и наиболее распространенного метода рассмотрен способ изготовления биметаллов посредством комбинирования основных методов, а именно, сварка взрывом вместе с холодной прокаткой, которая позволяет получать изделие с большой прочностью и бездефектной структурой.

Ключевые слова: биметаллические материалы, комбинированное литье, пакетная прокатка, плакирование взрывом, холодная сварка прокаткой, прессование биметаллов, волочение

Введение. В современном машиностроении применяют новейшие технологии изготовления композиционных материалов из нескольких металлов и их сплавов. Одним из таких композиционных материалов являются биметаллы — вид металлических слоистых композиционных материалов, состоящих из двух и более слоев металлов, которые соединены между собой прочной неразъемной металлической связью [1–4]. Их отличает высокая прочность, долговечность, тепло- и электропроводность, а также стойкость к коррозии.

По области применения биметаллы можно подразделить на четыре группы.

1. *Антикоррозионные биметаллы* представляют собой дешевые металлы (например, сталь 3), покрытые более тонким слоем коррозионностойкого металла [3]. Покрытие осуществляют с одной или обеих сторон основного металла. В качестве покрытия используют коррозионно-стойкую сталь, хром, титан, цинк, никель, алюминий и другие металлы. Антикоррозионный биметалл применяют в таких сферах промышленности, как нефтеперерабатывающая, химическая, пищевая промышленность и судостроение. Недостатком биметалла при таком использовании, как правило, служит наличие незащи-

щенного края у готового изделия. Именно с этой зоны биметалл начинает ржаветь, происходит электрохимическая коррозия (рис. 1).

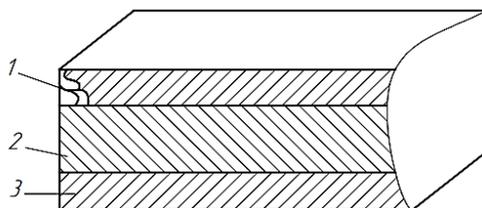


Рис. 1. Схема антикоррозионного биметалла:

1 — дефекты; 2, 3 — биметалл

Один из примеров — технология нанесения защитного антикоррозионного цинкового покрытия на металлическую поверхность элементов патронов стрелкового оружия [4]. Этот способ заключается в обезжиривании поверхности, травлении, промывках и нанесении покрытия гальваническим способом.

2. *Термочувствительные биметаллы* — металлические комбинированные материалы, состоящие из двух или нескольких слоев с различными коэффициентами теплового расширения (КТР), прочно сваренных по всей поверхности соприкосновения [3]. Составляющая с высоким КТР называется активной, с низким — пассивной. Основное свойство этих биметаллов — термочувствительность, т. е. способность менять форму при изменении температуры. Из-за разницы в КТР металлов при нагреве пластина из биметалла изгибается в сторону металла с меньшим КТР.

В 2016 году была предложена инновационная модель, представляющая собой термочувствительный актуатор электрических переключателей, применяемых для защиты электрических цепей от перегрузок. Использовался биметаллический актуатор, состоящий из слоев с разными температурными коэффициентами расширения, а также язычка с электрическим контактом, выполненного из биметалла. Это обеспечивало стабильную и точную работу актуатора [5].

3. *Высокочастотные проводники* — проводники, в которых вследствие скин-эффекта (эффекта уменьшения амплитуды электромагнитных волн по мере их проникновения в глубь проводящей среды) плотность переменного тока падает к середине проводника [3]. Поэтому иногда целесообразно заменять центральную часть проводника металлом с худшими электрическими характеристиками. В качестве примера можно привести биметаллическую проволоку медь + железо (медь снаружи); медь + серебро (серебро снаружи) или алюминий + медь (медь снаружи).

Однако у биметаллической проволоки есть существенный недостаток — неоднородность толщины переходной зоны, где припойный металл увеличивает свою толщину в нижней части проволоки, что, в свою очередь, портит прочность связи между металлами сердечника и оболочки, а следовательно, и качество самой проволоки. Тем не менее в 2017 году нашлось решение: создать новую переходную зону, где металлы сердечника и оболочки соединены с углеродными нанотрубками [6]. Благодаря высокому качеству этой проволоки можно быть уверенным в ее надежности даже в условиях интенсивных растягивающих и изгибающих нагрузок [6].

4. *Антифрикционные биметаллы* — материалы, в качестве основы которых используется низкоуглеродистая сталь 30 [3]. Плакирующий слой у данных материалов производится из алюминия или бронзы, поэтому их отличают скользящая гладкая поверхность и высокая прочность. Свое широкое применение они нашли при изготовлении подшипников скольжения.

Еще одно перспективное направление заключается в использовании антифрикционного сплава на алюминиевой основе, покрывающего стальную основу. Однако, как всегда, за каждым шагом вперед стоит вызов: традиционные методы не позволяют создавать биметаллический материал с толщиной, превышающей 6,2 мм [7, 8].

Поэтому стали действовать следующим образом: сначала стальная основа подвергалась сложному процессу обработки, включая раскрой, отжиг, правку и шлифовку. Затем на нее наносился антифрикционный сплав на алюминиевой основе, после чего материалы собирали в пакеты для холодной прокатки с высоким уровнем обжатия. После процесса прокатки следовал отжиг, дополнительная правка и контроль качества [7, 8].

Этот технологическое решение не только повышает качество биметалла, но и расширяет границы возможностей производства за счет увеличения разнообразия по толщине материала. Такие инновации открывают новые перспективы в производстве и позволяют создавать более надежные и эффективные материалы для различных отраслей промышленности.

Комбинированное литье. Способ заключается в следующем: в изложницу для слитков закладывают перфорированные разделительные листы, отмечающие положение будущей плоскости соединения между металлами А и Б, затем заливают металлы А и Б одновременно из двух ковшей через две воронки, контролируя равенство высот зеркала жидкого металла в обеих частях изложницы (рис. 2) [9]. Затем биметаллический слиток прокатывают на плакированные листы или фасонные профили. Возможна заливка более двух металлов. Разновидностью способа является заливка одного жидкого металла на слой твердого, который предварительно помещен в изложницу (рис. 3).

Еще одна разновидностью комбинированного литья — непрерывное литье и деформация. Проблемы производства биметаллических листов могут быть решены с использованием принципиально новой установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации [9, 10]. Эта технология предполагает непрерывное литье биметаллической полосы, включающее подачу сплава алюминия в жидком состоянии в кристаллизатор, а затем соединение стальной полосы с кристаллизирующейся оболочкой плакировочного слоя путем обжатия с высокой степенью деформации и последующей калибровки (рис. 4).

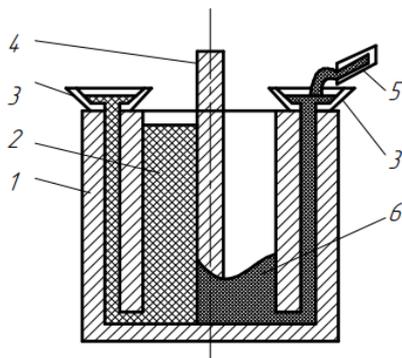


Рис. 2. Последовательная отливка металлов с применением выдвигной перегородки:

1 — форма; 2 — залитый металл; 3 — разливочная воронка; 4 — перегородка;
5 — желоб; 6 — заливаемый металл

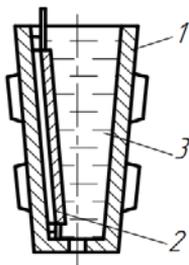


Рис. 3. Производство однослойного биметаллов заливкой:

1 — изложница; 2 — твердый слой металла; 3 — жидкий металл

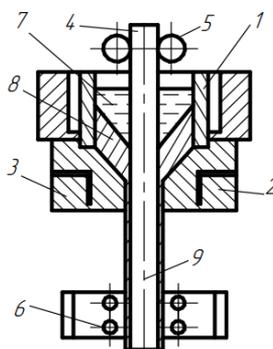


Рис. 4. Получение биметаллической полосы:

1 — неразъемный кристаллизатор; 2, 3 — стенки-бойки разъемного кристаллизатора; 4, 5 — направляющие ролики; 6 — тянущие ролики; 7 — расплав металла плакирующего слоя; 8 — оболочка плакирующего металла; 9 — полоса основного металла

Эта технология позволяет получить плакирующий слой одинаковой толщины по всему периметру основной полосы, что особенно важно для получения биметалла типа сталь + медь в электротехнической промышленности. Внедрение в производство установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации позволяет создать ресурсосберегающие технологические процессы, существенно повысить производительность.

Пакетная прокатка. По способу пакетной прокатки плакированные листы получают путем прокатки собранных и сваренных многослойных пакетов (рис. 5).

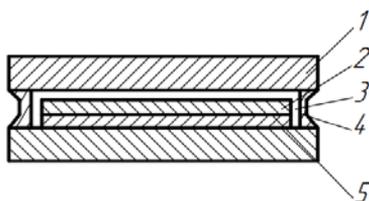


Рис. 5. Схема составления пакетов двойного симметричного биметалла перед прокаткой:

1 — пакет; 2 — свариваемая заготовка; 3 — планка; 4 — технологическое сварное соединение; 5 — поверхности свариваемых заготовок

В зависимости от назначения расположение и число слоев могут быть различными (двух-, трех- и четырехслойные пакеты) [9]. Сущность метода пакетной прокатки заключается в том, что основной и плакирующий металл собирают вместе в пакет, который обваривают герметичными швами и заполняют инертным газом. Затем пакет перед прокаткой нагревают до температуры 1150...1250 °С, при которой происходит растворение и восстановление окислов на всех поверхностях герметичного объема. Последующая прокатка с обжатием не менее 60 % приводит к сварке основного металла с плакирующим слоем. Прокатывают такой пакет на обычных толстолистовых станах.

Плакирование взрывом. Соединение двух металлов взрывом применяют для таких пар материалов, соединить которые другими способами плакирования трудно (из-за нерастворимости друг в друге, большом различии в сопротивлении деформации и т. д.) или же для изготовления изделий специального назначения. Для этого способа характерно применение основного металла и плакирующего материала в холодном состоянии. Плакирующий лист располагают под небольшим углом к основному или просто накладывают один на другой. Затем устанавливают бортики и на поверхность плакирующего листа помещают взрывчатое вещество с детонатором (рис. 6) [9].

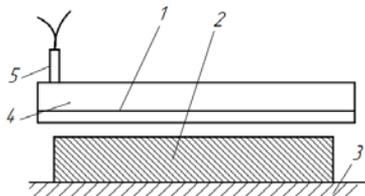


Рис. 6. Схема плакирования сваркой взрывом плоских поверхностей:

1 — пластина плакирующего металла; 2 — основной металл; 3 — основание;
4 — взрывчатое вещество; 5 — детонатор

При взрывной сварке биметаллических пластин происходит высвобождение струи металла из поверхностных слоев основного и плакирующего материала. Это явление не только способствует удалению загрязнений, но также обеспечивает образование очень чистых поверхностей при соединении материалов. Для проведения взрывов используются специально оборудованные бункеры. После взрыва, осуществляется контроль качества соединения, обрезка краев и обработка поверхности готового биметалла.

Существует также комбинированный метод сварки взрывом и горячей пакетной прокатки для создания биметаллических изделий с плакирующим слоем из износостойких инструментальных сталей и основной из углеродистых и низколегированных сталей [11]. При этом процессе, тонкий слой малоуглеродистой стали наносят на поверхность стали плакирующего слоя с помощью взрывной сварки. Затем двухслойные заготовки собирают в пакет таким образом, чтобы при горячей прокатке пакета соединение происходило между слоями из малоуглеродистой стали. Этот метод гарантирует получение биметалла с высокими прочностными свойствами и бездефектной структурой соединения, с лицевым слоем из инструментальной стали и основным из высокопрочной стали, а также с промежуточной мягкой прослойкой из малоуглеродистой стали. Эксперименты показали, что разработанная технология обеспечивает прочное соединение по всей поверхности [11, 12].

Холодная сварка прокаткой. Холодную сварку прокаткой применяют для получения двух- или трехслойных биметаллов, состоящих из стальной основы и плакирующих слоев из цветных металлов, например, сталь + медь, сталь + латунь и др. (рис. 7) [9, 13, 14].

Для получения доброкачественного соединения слоев в биметалле требуется значительная деформация при сварке прокаткой и чистота соединяемых поверхностей, причем особенно важно отсутствие органических веществ. При сварке прокаткой соединение образуется в условиях принудительного деформирования и малой длительности взаимодействия.

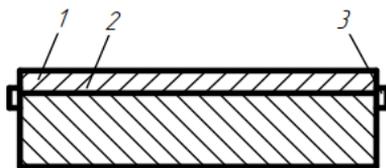


Рис. 7. Схема холодной сварки прокаткой:

1 — пакет, 2 — свариваемая заготовка, 3 — поверхности свариваемых заготовок

Вначале происходит подготовка поверхности заготовок, потом на двух валковом стане прокатывают с обжатием 50 % за один проход. Происходит промежуточный отжиг при температуре 330 °С в течение 1 ч. Поправляют полосы, калибруют, прокатывают. И делают окончательный отжиг при температуре 460 °С в течение 3 ч. Плакирование также выполняют накаткой порошка на полосу, а также путем прокатки порошковой ленты.

Прессование биметаллов. Самый простой способ прессования биметаллов заключается в горячем выдавливании через отверстие матрицы составной заготовки, имеющей круглое или трубное сечение с концентрическим расположением слоев. Заготовка может быть изготовлена из различных комбинаций сталей, металлов или сплавов [9, 15].

Для осуществления этого процесса можно использовать различные горизонтальные или вертикальные прессы, применяемые для прессования прутков, профилей или труб из цветных металлов и сталей. На рис. 8 приведена принципиальная схема процесса прессования биметаллического прутка.

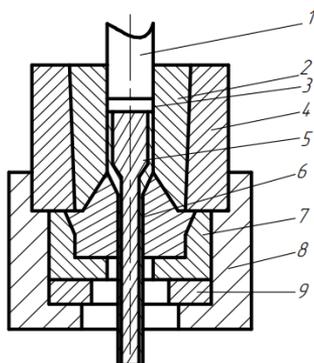


Рис. 8. Схема прессования биметаллической заготовки «пруток»:

1 — пресс-штемпель; 2 — внутренняя втулка контейнера; 3 — пресс-шайба;
4 — контейнер; 5 — прессуемая труба (пруток); 6 — матрица; 7 —
матрицедержатель; 8 — обойма матрицедержателя; 9 — зазорный клин

Для ряда биметаллических пар недопустим непосредственный контакт слоев заготовки в горячем состоянии вследствие образования хрупких интерметаллических соединений в области стыка, значительно ухудшающих прочность соединения основного и плакирующего материалов. Предотвратить взаимодействие между основным и плакирующим слоями трубы можно с помощью использования материала, который располагается в виде тонкой прослойки между внешним и внутренним патрубками заготовки [15].

Волочение. Совместное холодное волочение является методом получения биметаллической проволоки: сталь + алюминий или сталь + другие цветные металлы. На стальную проволоку (сердечник) со специально подготовленной поверхностью надевают рубашку в виде трубки, которая может быть бесшовной или в виде сформованной в трубку ленты. Если материал рубашки является высокопластичным, то при совместной пластической деформации в волоке происходит достаточно прочное соединение двух металлов. Полученная таким образом биметаллическая проволока может быть использована в качестве проводника электрического тока или как коррозионностойкая проволока для различных целей (рис. 9) [7–9].

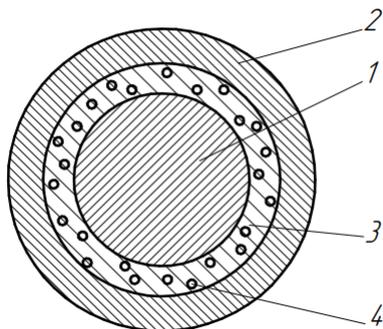


Рис. 9. Схема биметаллической проволоки:

1 — сердечник, 2 — оболочка, 3 — переходная зона, 4 — углеродные нанотрубки

Было проведено конечно-элементное моделирование волочения биметаллической проволоки из углеродистой стали (сердечник) и стали 12Х18Н10Т (тонкая оболочка) при единичных обжатиях 14,8 % (укороченный очаг деформации) и 31,6 % (удлиненный очаг деформации) показало, что в очаге деформации значительные растягивающие напряжения испытывают оболочки [16]. Для биметалла с сердечником из стали 10 (мягкий сердечник) уровень растягивающих напряжений в оболочке при обжатии 31,6 % выше,

чем для биметалла с сердечником из стали 80 (прочный сердечник). При волочении стали 10 необходимо применять меньшие единичные обжатия. Для биметалла с сердечником из стали 80 оболочка под действием радиальных напряжений деформируется интенсивнее сердечника. Это вызывает появление в сердечнике способствующих накоплению повреждений дополнительных растягивающих напряжений. Для снижения уровня растягивающих напряжений в сердечнике необходимы сравнительно высокие частные деформации, что подтверждается результатами моделирования волочения при обжатии 31,6 % [16].

Для удобства сравнения рассматриваемых выше методов приведена таблица, в которой описаны преимущества и недостатки каждого метода. На основе существующих недостатков были сформулированы перспективы развития каждого представленного метода (см. таблицу).

Сравнение методов изготовления биметаллических материалов

Метод изготовления	Достоинства	Недостатки	Перспективы развития
Комбинированное литье	Высокая точность границ между металлами. Применяется для заливки двух и более металлов	Требует использования специальной изложницы и процесса литья. Требует контроля высоты жидкого металла	Совершенствование изложницы и процесса литья
Пакетная прокатка	Позволяет создавать многослойные биметаллические листы с различными комбинациями металлов. Высокая прочность сварки между металлами	Требует предварительной сварки и герметизации пакета. Требует нагрева пакета перед прокаткой	Совершенствовать процесс предварительной сварки, герметизации и нагрева пакета
Плакирование взрывом	Применяется для пар материалов, которые сложно соединить другими методами. Обеспечивает очень чистые поверхности при соединении материалов	Требует взрывчатое вещество надлежащего качества. Строгое соблюдение безопасности и контроль процесса	Улучшать взрывчатое вещество, чтобы оно было надлежащего качества

Окончание таблицы

Метод изготовления	Достоинства	Недостатки	Перспективы развития
Холодная сварка прокаткой	Позволяет создавать двух- и трехслойные биметаллы из стали и цветных металлов с высокой чистой соединением. Процесс осуществляется без нагрева	Требует процесса холодной прокатки с обжатием. Необходим отжиг и калибровка	Улучшение процесса отжига и калибровки
Прессование биметаллов	Простой и эффективный метод для создания биметаллических заготовок с круглым или трубным сечением. Может быть применен для создания различных комбинаций металлов	Ограничен выбор материалов. Требует специального оборудования и матриц для каждой конкретной конфигурации	Увеличение выбора материалов и совершенствование оснащения
Волочение	Позволяет получать биметаллическую проволоку. Обеспечивает прочное соединение двух металлов без нагрева	Требует высокой пластичности материалов для холодной деформации. Подготовка рубашки важна для качественного соединения	Совершенствование рубашки для качественного соединения

Заключение. Биметаллические слоистые композиционные материалы очень востребованы, потому что они позволяют сочетать свойства различных металлов. В современной промышленности растет тенденция к комбинированию известных методов изготовления биметаллов. Активно развивается метод сварки взрывом. Также появляются способы, которые имеют небольшую научную базу, например, аддитивный способ изготовления биметаллов. Поэтому важно подчеркнуть значимость изучения и совершенствования методов изготовления биметаллов для развития современных технологий и повышения качества производимой продукции.

Литература

- [1] Бердыченко А.А. Способы получения биметалла сталь-титан. Исторический обзор. *Ползуновский вестник*, 2017, № 4, с. 129–137.
- [2] Голованенко С.А., Меандров Л.В. *Производство биметаллов*. Москва, Металлургия. 1966, с. 8–56.

- [3] Сиротенко Л.Д., Шлыков Е.С., Абляз Т.Р. Применение биметаллических материалов в машиностроении. *Современные проблемы науки и образования*, 2015, № 2–1, 163 с.
- [4] Яшкин В.А., Степанов Н.В., Захарьящев В.В. и др. *Способ нанесения защитного антикоррозионного цинкового покрытия на металлическую поверхность*. Патент № 2495362 С1 РФ, МПК F42В 5/26, 2013.
- [5] Гаврюшин С.С., Николаева А.С. *Термочувствительный актюатор*. Патент № 159005 U1 РФ, МПК H01Н 37/54, 2015.
- [6] Андреев А.В. *Биметаллическая проволока*. Патент № 185093 U1 РФ, МПК В23К 35/12, 2018.
- [7] Маковский В.А., Ейльман Л.С. *Биметаллические прутки*. Москва, Металлургия, 1981, 180 с.
- [8] Плужников Ю.В., Колмаков А.В., Бастрыкин В.В., Лаврентьев А.П. *Способ изготовления биметалла с антифрикционным сплавом на алюминиевой основе для вкладышей подшипников скольжения*. Патент № 2377107 С2 РФ, МПК В23К 20/04, 2009.
- [9] Миронов С.Ю. Современные технологии нанесения защитных покрытий. *Студенческая весна 2013. Машиностроительные технологии. Всерос. науч.-техн. конф.: тр.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, № гос. регистрации 0321300796. URL: studvesna.qform3d.ru/go=articles&id=798 (дата обращения 18.09.2024)
- [10] Лехов О.С., Турлаев В.В., Лисин И.В., Туев М.Ю. Исследование совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для производства биметаллических полос. *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*, 2014, № 4 (48), с. 69–73.
- [11] Шишкин Т.А., Первухина О.Л., Николаенко П.А. Особенности получения и разрушения биметалла из инструментальных и высокопрочных сталей, полученного комбинированием методов сварки взрывом и горячей пакетной прокатки. *Вестник ТГУ*, 2013, т. 18, вып. 4, с. 1897–1898.
- [12] Шишкин Т.А., Первухина О.Л., Первухин Л.Б. Комбинированный метод изготовления биметалла (сварка взрывом и горячая пакетная прокатка). *Научно-технический прогресс в черной металлургии. II Междунар. науч.-техн. конф.: матер.* Череповец, Череповецкий государственный университет, 2015, 152 с.
- [13] Степанов А.П. Опыт прокатки биметаллических стальных листов. *Будущее машиностроения России. 11-я Всерос. конф. молодых ученых и специалистов (с междунар. уч.): сб. докл.* Москва, Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2018, с. 223–225.
- [14] Фролов В.А., Пешков В.В., Коломенский А.Б., Казаков В.А. *Сварка. Введение в специальность*. Москва, Интермет Инжиниринг, 2004, с. 291–293.

- [15] Фокин Н.В., Космацкий Я.И. Особенности прессования биметаллических труб. *Актуальные направления научных исследований: от теории к практике*, 2015, № 1 (3), с. 263–264.
- [16] Даненко В.Ф., Гуревич Л.М. Моделирование процесса волочения биметаллической проволоки углеродистая сталь+12X18Н10Т при различной степени деформации. *Моделирование и развитие процессов ОМД*, 2018, № 27, с. 3–10.

Поступила в редакцию 31.03.2025

Янко Мария Алексеевна — аспирантка кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Девятченко Анастасия Владиславовна — студентка кафедры «Технологии ракетно-космического машиностроения», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Янко М.А., Девятченко А.В. Обзор методов изготовления биметаллических материалов. *Политехнический молодежный журнал*, 2025, № 3 (98). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/metmat/mstp/1046.html>

REVIEW OF THE BIMETALLIC MATERIALS MANUFACTURE METHODS

M.A. Yanko

yanko@bmstu.ru

SPIN-code: 9107-0563

A.V. Devyatchenok

devyatchenokav@student.bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

The paper presents a review of main methods in the bimetallic materials manufacture in the modern industrial production. It presents and analyzes a group of bimetals according to their application area. The paper also provides a detailed description of the main methods in the bimetals manufacture, including combined casting, pack rolling, explosion cladding, cold rolling welding, bimetal pressing, and drawing. Their advantages and disadvantages are comparatively analyzed. The technique for bimetals manufacture by combining the main methods, namely, explosion welding together with the cold rolling making it possible to obtain a product with high strength and a defect-free structure is considered as the promising and most common method.

Keywords: bimetallic materials, combined casting, pack rolling, explosion cladding, cold rolling welding, bimetal pressing, drawing

Received 31.03.2025

Yanko M.A. — Postgraduate, Department of Rocket-and-Space Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Devyatchenok A.V. — Student, Department of Rocket-and-Space Engineering Technologies, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Yanko M.A., Devyatchenok A.V. Review of the bimetallic materials manufacture methods. *Politekhnicheskiy molodezhnyy zhurnal*, 2025, no. 3 (98). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/metmat/mstp/1046.html>