

УДК 621.77

Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Пивоварова К.Г., Тандон П., Кожемякина А.Е.

ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА АККУМУЛИРУЮЩЕЙ ПРОКАТКИ МНОГОСЛОЙНЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ

Аннотация. Одним из ключевых направлений научно-технического развития является разработка интеллектуальных производственных технологий создания новых металлических материалов и способов их конструирования с повышенными механическими и функциональными свойствами для инновационных применений в автомобильной, военной и других отраслях промышленности. Перспективными в этой области являются технологии, основанные на использовании методов интенсивной пластической деформации, среди которых можно выделить аккумулялирующую прокатку. Ее преимущества заключаются в простоте процесса, относительно доступном и недорогом оборудовании, высокой производительности и непрерывном производстве, что приводит к увеличению промышленных возможностей процесса. Однако, несмотря на многообразие известных методов аккумулялирующей прокатки и высокую эффективность некоторых из них, имеются проблемы, связанные с неравномерностью деформации при прокатке и недостаточной прочностью соединения слоев. Для повышения эффективности процесса аккумулялирующей прокатки, предлагается прокатывать многослойные металлические материалы с применением асимметрии.

Ключевые слова: многослойные металлические материалы, интенсивная пластическая деформация, аккумулялирующая прокатка, асимметричная прокатка, опытно-экспериментальный прокатный стан.

Благодарность

1. Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 20-69-46042 от 20.05.2020). The study was supported by a grant of the Russian Science Foundation (project No. 20-69-46042 of 20.05.2020)
2. Исследования выполнены в рамках гранта РФФИ (договор №18-58-45013\19 IND_a от 14.10.2019). The study was supported by a grant of the RFBR (contract No. 18-58-45013\19 IND_a from 14.10.2019)

Для транспортного, химического, энергетического, атомного, морского машиностроения, авиакосмической техники требуются материалы, обладающие высокой удельной прочностью, коррозионной стойкостью, сниженной массой и стоимостью. Этим требованиям отвечают многослойные металлические материалы [1-4]. Важнейшей задачей в области создания многослойных металлических материалов является разработка методов направленного регулирования их структуры и свойств, которые обеспечили бы требуемые эксплуатационные характеристики.

Множество исследований посвящено изучению влияния методов получения и деформационно-термической обработки на различные свойства многослойных металлических материалов [1-3]. Большой вклад в развитие теории и практики многослойных металлических материалов внесла магнитогорская научная школа «МГТУ им. Г.И. Носова» во главе с Г.Э. Аркулисом и В.Л. Стеблянко. Аркулис Г.Э. являлся создателем теории совместной пластической деформация разных металлов. Стеблянко В.Л. основал новое научное направление в теории и технологии сварки давлением разнородных металлов, обработки металлических поверхностей электроразрядной плазмой, включая очистку и формирование функциональных покрытий.

К основным методам производства слоистых композитов относят: литейное плакирование, горячее и холодное пластическое деформирование (прокатка, прессование, волочение, винтовая экструзия), сварку взрывом, электрошлаковую наплавку, комбинирован-

ные способы (литье + прокатка, сварка взрывом + прокатка и т.д.), аккумулялирующую прокатку и равноканальное угловое прессование (РКУП).

Методы ИПД являются одними из самых современных и экономически обоснованных способов получения высоких значений механических свойств металлов и сплавов. С их помощью стало возможным получать ультрамелкозернистую структуру. Такие структурные изменения приводят к значительному увеличению прочности – в 2 раза данный параметр возрастает в чистом металле и на 40-80% в сплавах [4].

Разработка технологий ИПД является сложной научно-технической задачей. В настоящее время известны несколько различных схем ИПД, в частности кручение под высоким давлением, всесторонняя ротационная ковка, винтовая экструзия, равноканальное угловое прессование, пакетная гидроэкструзия. Данные процессы, несмотря на возможность получения ультрамелкозернистой структуры, не являются технологически выгодными из-за невозможности получения длинномерных изделий и недостаточной производительности. Этих недостатков можно избежать применением аккумулялирующей прокатки. Суть метода аккумулялирующей прокатки заключается в сборке пакета из последовательно чередующихся листов металлов и последующей прокатке пакета до толщины, равной толщине одного исходного слоя, составляющего композит. Затем осуществляется раскрой полученного проката, сборка очередного пакета и повторение описанного технологического цикла до получения требуемой толщины слоев в заготовке [5]. Таким образом осуществляется несколько проходов, количество которых ограничено размерами образца, уменьшающимися из-за

обрезки кромок. Основными преимуществами процесса аккумулярующей прокатки являются простота процесса, относительно доступное и недорогое оборудование, высокая производительность и непрерывное производство, что приводит к увеличению его промышленных возможностей [6].

Пример схемы процесса аккумулярующей прокатки многослойных материалов приведен на рис. 1 [7]. Перед прокаткой проводят мерную резку заготовок из листов, обработку их поверхности, сборку нарезанных листов в пакет, вакуумирование пакета, нагрев в печи до температуры 1000°C и последующее пластическое деформирование методом горячей прокатки.

Возможно совмещение процессов аккумулярующей прокатки и диффузионной сварки. В работе [8] приведено описание метода диффузии-прокатки для получения многослойного композита из Cu и Fe. На

рис. 2 изображена принципиальная технологическая схема обработки.

На рис. 3 приведена схема процесса аккумулярующей прокатки биметаллических листов Al-Mg [9]. Перед началом процесса прокатки заготовки очищают от загрязнений ацетоном и удаляют оксидный слой проволочными щетками. Затем листы укладывают в порядке Al/Mg/Al и соединяются в лист толщиной 4,5 мм. Сложенные листы выдерживают в печи при температуре 250°C в течение 20 мин. Предварительно нагретые штабелированные листы прокатываются сразу после извлечения из печи. Диаметр валков 120 мм, скорость прокатки 30 об/мин. Многослойный лист после прокатки охлаждают на воздухе и разрезают на требуемую длину, затем цикл повторяется. Процесс завершается в три этапа с выходом конечного многослойного листа толщиной 1,4 мм.

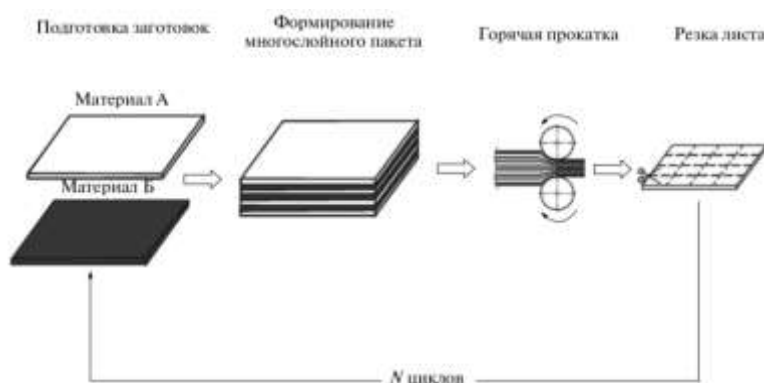


Рис 1. Схема технологического процесса аккумулярующей прокатки

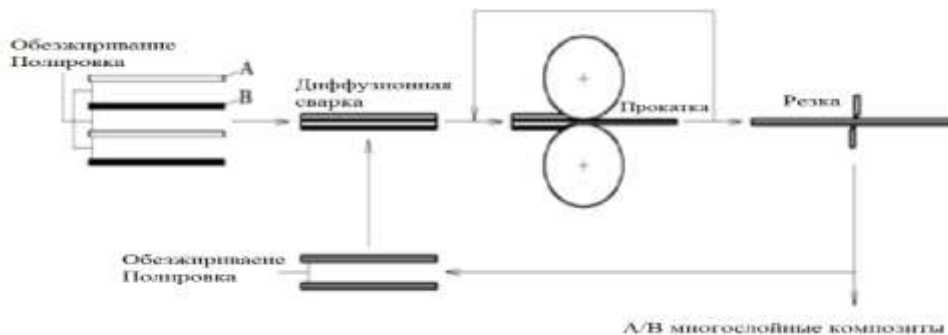


Рис. 2. Схема повторяющегося процесса диффузионной сварки и прокатки

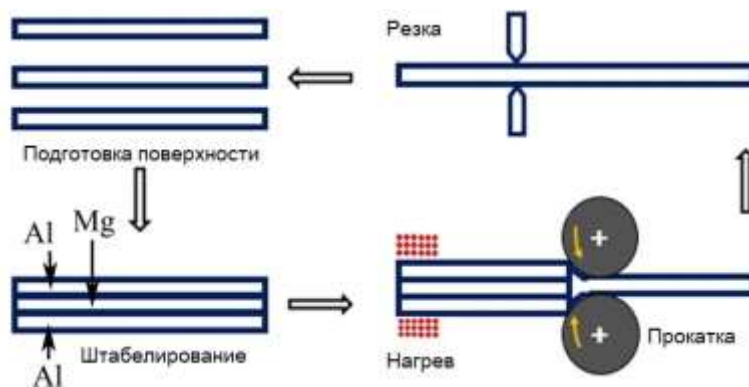


Рис. 3. Схема процесса аккумулярующей прокатки биметаллических листов Al-Mg

Аккумулирующая прокатка была успешно применена для получения алюмоматричных композитов Al-SiC [10]. Согласно этой технологии собирается пакет из двух алюминиевых листов, между подготовленными контактирующими поверхностями вводятся армирующие частицы (например, SiC, FeTiO₃) (рис. 4). Такое армирование позволяет повысить прочность материала, не увеличивая при этом существенно его вес. В работе [11] исследовано влияние добавления частиц SiC на микроструктуру и механические свойства композитов при аккумулирующей прокатке. Процентное содержание вводимых частиц SiC варьировалось в диапазоне 1, 2 и 4 об.%. Такая микроструктура привела к повышению твердости, прочности и относительного удлинения в процессе. При увеличении объемной доли частиц SiC до 4 об.% предел текучести и прочность композиционных листов увеличиваются более чем в 1,2 и 1,3 раза по сравнению с алюминиевыми листами.

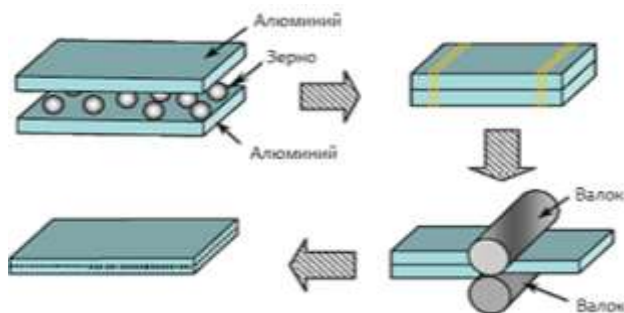


Рис. 4. Схема процесса аккумулирующей прокатки алюмоматричных композитов

Неравномерность деформации слоистых композиций при аккумулирующей прокатке, зависящая от соотношения сопротивлений деформации составляющих, исходных толщин слоев и порядка их укладки, параметров очага деформации, а также от контактных сил трения и касательных напряжений на границах соединения, оказывает отрицательное влияние на процесс прокатки и свойства биметалла, т.к. приводит к возникновению значительных остаточных напряжений, которые могут вызывать расслоение биметалла, его изгиб, коробление, разрыв более твердых слоев [12].

Для повышения эффективности процесса аккумулирующей прокатки предлагается прокатывать биметаллы с применением асимметрии [13]. Асимметричная прокатка – это один из наиболее экономичных способов ИПД для повышения качества готового проката, т.к. является видом усовершенствования производства проката, который возможно внедрять без полной реконструкции на современных агрегатах. При этом процессе отсутствует полная симметрия относительно горизонтальной плоскости, т.е. или диаметры рабочих валков различны, или различно состояние их поверхности, или один из валков не приводной, или валки имеют разную скорость и прочие (рис. 5).

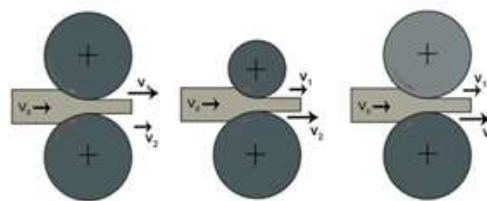


Рис. 5. Виды асимметричной прокатки

Учеными Магнитогорского государственного технического университета разработано устройство для асимметричной прокатки толстолистового металла [14] (рис. 6). Устройство содержит прокатную клетку с валками разного диаметра и установленный за клетку отгибующий ролик. Оно снабжено датчиком положения отгибующего ролика, индикатором наличия металла, расположенным в месте пересечения вертикальной оси ролика с траекторией движения листа. Отгибующий ролик выполнен с возможностью перемещения в вертикальной плоскости. Устройство обеспечивает создание стабильной кинематической зоны опережения на верхнем валке и сдерживание ее роста на нижнем валке, что исключает асимметрию зон трения на валках.

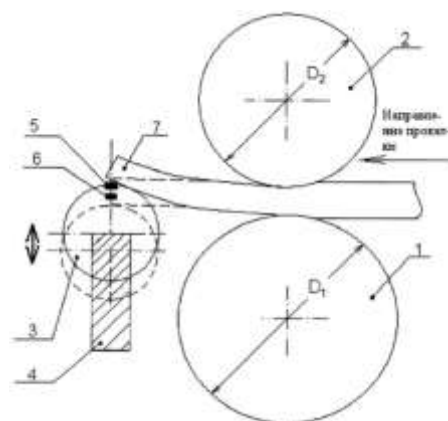


Рис. 6. Устройство для асимметричной прокатки: 1 – нижний валок; 2 – верхний валок; 3 – отгибующий ролик; 4 – механизм перемещения; 5 – датчик положения; 6 – индикатор наличия металла; 7 – лист

Для оценки деформированного состояния, условий прямолинейного выхода металла из валков было произведено моделирование процессов симметричной и асимметричной аккумулирующей прокатки в программном комплексе Deform 2D [4]. В качестве материала использовались биметаллы Al5083/Al2024, Al6061/Al2024, Al7075/Al2024, Al5083/Al1070, Al6061/Al1070.

Моделирование процесса асимметричной прокатки алюминиевых биметаллов с рассогласованием скоростей валков показало следующие результаты: при увеличении скоростной асимметрии от 10 до 50% изменяется прямолинейность выхода металла из очага деформации. Наблюдается значительный изгиб переднего и заднего концов полосы практически во всех случаях моделирования. Влияние на изгиб полосы

оказали в первую очередь скорости валков и значения коэффициентов трения. Наиболее благоприятным случаем выступают эксперименты при коэффициенте трения $f = 0,3$. Рассогласование скоростей валков зависело от вида алюминиевого сплава: чем прочнее была марка нижнего слоя, тем большая разность скоростей требовалась для прямолинейного выхода полосы (при обработке сплавов Al5083/Al1070 и Al6061/Al1070 рассогласование составило 20 %, а для прокатки Al5083/Al2024 и Al6061/Al2024 необходимо рассогласование в 40%).

Для проведения дальнейших исследований в лаборатории «Механика градиентных наноматериалов» ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» приобретен опытно-экспериментальный прокатный стан. Характеристики стана приведены в таблице.

Технические характеристики
опытно-экспериментального прокатного стана
для асимметричной прокатки

1. Тип стана	Реверсивный одноклетевой ДУО листовой прокатки с индивидуальным приводом рабочих валков
2. Максимально допустимое усилие прокатки	2500 кН (250 тс)
3. Максимально допустимый момент прокатки	2×65 кН·м (2×6,5 тс·м)
4. Номинальный диаметр рабочих валков	340 мм
5. Прокатываемые материалы	Листовые заготовки из черных (Fe) и цветных (Al, Cu, Ti) металлов и сплавов с пределом текучести до 1500 МПа
6. Начальные размеры исходных листовых заготовок на входе:	
максимальная толщина	50 мм
максимальная ширина	380 мм
7. Конечные размеры готовых листов на выходе:	
минимальная толщина	0,3±0,03 мм
максимальная ширина	380 мм
8. Режимы работы прокатного стана	1. Асимметричная прокатка с рассогласованием окружных скоростей двух рабочих валков 2. Симметричная прокатка с одинаковыми окружными скоростями двух рабочих валков
9. Тип главного электропривода	Индивидуальный
10. Максимальный крутящий момент на каждом рабочем валке	65 кН·м (6,5 тс·м)
11. Нажимное устройство	Гидравлическое
12. Масса прокатного стана (всего оборудования в сборе)	≈ 20 т
13. Установленная электрическая мощность прокатного стана	200 кВт (суммарно)

Прочность сцепления является одним из важнейших показателей эффективности многослойных металлических материалов [15-18]. Плохая межфазная прочность сцепления приводит к разделению слоев. Повышенная прочность сцепления может быть достигнута путем создания волнообразных контактных поверхностей с механическим сцеплением за счет межфазного вогнуто-выпуклого замкового эффекта. Схема слоистого композита Al-сталь приведена на рис. 7.

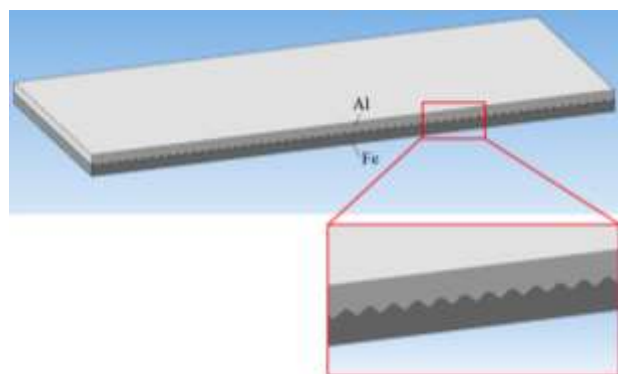


Рис. 7. Схема слоистого композита Al-сталь с механическим соединением

Взаимное проникновение твердого материала в мягкий материал на границе раздела может быть достигнуто за счет специальной технологии аккумулирующей холодной прокатки. Этот метод состоит из двух проходов холодной прокатки с общим уменьшением толщины на 50%. Во время первого прохода холоднокатаная склейка выполняется двумя рабочими валками, один из которых гладкий, а второй рабочий валок имеет специальный микроскопический синусоидальный профиль поверхности (рис. 8). Амплитуда синуса $a = 0,25$ мм и период $T = \pi / 2$ мм (рис. 9). Во время второго прохода холоднокатаная склейка выполняется двумя гладкими рабочими валками. В результате может быть получен слоистый композит из Al-стали с волнистой поверхностью раздела.

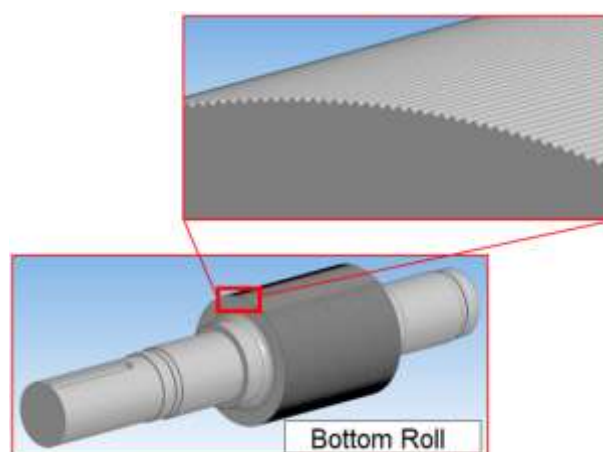


Рис. 8. Рабочий валок с микроскопическим синусоидальным профилем поверхности

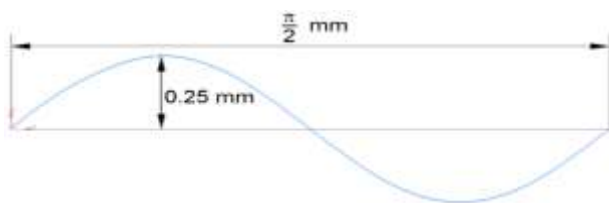


Рис. 9. Размеры синусоидальной волны

В работе [19] с использованием программного комплекса QForm проведено моделирование процесса изготовления композита, состоящего из алюминиевого сплава 6082 и стали DC04. Проанализировано влияние синусоидального профиля рабочего вала на поведение композиционного слоя. В результате проведения численного эксперимента показано, что данная технология аккумулирующей холодной прокатки способна ввести дополнительную пластическую деформацию на границе раздела композита по сравнению с обычным процессом аккумулирующей прокатки. Результаты исследования поведения межфазных связей могут быть полезны при разработке усовершенствованной технологии сварки холодным давлением для изготовления композитов Al-сталь с высокой прочностью соединения.

Вывод. Предложены технологические решения для получения слоистых металлических материалов с помощью процесса аккумулирующей прокатки. Для повышения эффективности процесса аккумулирующей прокатки предлагается прокатывать биметаллы с применением асимметрии. Прочность сцепления является одним из важнейших показателей эффективности слоистых композитов. Повышенная прочность сцепления слоистых композитов может быть достигнута путем создания волнообразных контактных поверхностей за счет межфазного вогнуто-выпуклого замкового эффекта.

Список литературы

1. Современные направления развития производства и применения двухслойных сталей / А.И. Зайцев, И.Г. Родионова, А.В. Амежнов, А.А. Павлов // *Технология колесных и гусеничных машин*. 2013. № 3 (7). С. 17-22.
2. Хузин Р.Р., Зарипов М.З. Исследование влияния сопутствующей обработки на свойства сварного соединения из биметалла 09Г2С+08Х13 // *Argiogi*. Серия: Естественные и технические науки. 2018. № 3. С. 1-10.
3. Формирование структуры в зоне соединения сваренного взрывом биметалла 08Х13+09Г2С после горячей прокатки / В.Н. Арисова, А.Ф. Трудов, А.Г. Серов, Ю.А. Лобашук // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2018. № 9. С. 34-40.
4. Бирюкова О.Д., Пустовойтов Д.О. Анализ и математическое моделирование процесса асимметричной прокатки алюминиевых сплавов серий 1xxx, 2xxx, 5xxx-7xxx // *Журнал технических исследований*. 2019. Т. 5. № 1. С. 53-59.
5. Белошенко В.А., Дмитренко В.Ю., Чижко В.В. Модификация структуры и свойств Cu-Fe-композитов методами обработки давлением // *Физика металлов и металловедение*. 2015. Т. 116. № 5. С. 484-484.
6. Rahmatabadi D. et al. Fracture toughness investigation of Al1050/Cu/MgAZ31ZB multi-layered composite produced by accumulative roll bonding process // *Materials Science and Engineering: A*. 2018. Vol. 734. P. 427-436.
7. Исследование многослойного материала на основе нержавеющей стали, полученного методом горячей пакетной прокатки / Т.И. Табатчикова, И.Л. Яковлева, А.И. Плохих, С.Ю. Дельгадо Рейна // *Физика металлов и металловедение*. 2014. Т. 115. № 4. С. 431.
8. Yang Y. et al. Evolution of structure and fabrication of Cu/Fe multilayered composites by a repeated diffusion-rolling procedure // *Materials & Design*. 2015. Vol. 85. P. 635-639.
9. Cheepu M. et al. Fabrication and analysis of accumulative roll bonding process between magnesium and aluminum multi-layers // *Applied Mechanics and Materials*. 2018. Vol. 877. P. 183-189.
10. Fathy A. et al. Evaluation of mechanical properties of 1050-Al reinforced with SiC particles via accumulative roll bonding process // *Journal of Composite Materials*. 2019. Vol. 53. № 2. P. 209-218.
11. Khair A. I., Fathy A. Enhanced strength and ductility of Al-SiC nanocomposites synthesized by accumulative roll bonding // *Journal of Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9. № 1. P. 478-489.
12. Моделирование деформаций при горячей прокатке магниево-алюминиевого композита / Л.М. Гуревич, Ю.П. Трыков, В.Н. Арисова, И.А. Пономарева, Д.В. Щербин // *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2015. № 8 (168). С. 120-124.
13. Бирюкова О.Д., Пустовойтов Д.О., Песин А.М. Исследование метода аккумулирующей прокатки как способа обработки алюминиевых композитов 5083/2024 и 5083/1070 // *Теория и технология металлургического производства*. 2019. № 2 (29). С. 37-42.
14. Пат.2254943 РФ, МПК В 21 В 1/22. Устройство для асимметричной прокатки толстолистового металла / Песин А.М., Салганик В.М., Дригун Э.М., Чикишев Д.Н.; заявитель и патентообладатель Магнитогорск. гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова (RU). – 2004103203/02; заявл. 04.02.2004; опубл. 27.06.2005, Бюл. № 3. – 4 с.: ил.
15. Gullino A., Matteis P., D’Aiuto F. Review of aluminum-to-steel welding technologies for car-body applications // *Metals*. 2019. Vol. 9. № 3. P. 315.
16. Groche P. et al. Joining by forming—a review on joint mechanisms, applications and future trends // *Journal of Materials Processing Technology*. 2014. Vol. 214. № 10. P. 1972-1994.
17. Schmidt H. C. et al. Joining of blanks by cold pressure welding: Incremental rolling and strategies for

- surface activation and heat treatment // Materialwissenschaft und Werkstofftechnik. 2019. Vol. 50. № 8. P. 924-939.
18. Haraga K. Strength Properties of Aluminium/Aluminium and Aluminium/Steel joints for light weighting of automotive body // Welding in the World. 2000. Vol. 44. P. 23-27.
19. Pesin A. et al. FEM simulation of fabrication of Al-Steel layered composites with mechanical bonding through the interfacial concavo-convex lock effect // Procedia Manufacturing. 2020.

Сведения об авторах

Песин Александр Моисеевич – д-р техн. наук, проф. кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»; Магнитогорск, Россия. Тел.: 29-85-25. E-mail: a.pesin@magtu.ru.

Пустовойтов Денис Олегович – канд. техн. наук, доцент кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: 29-85-25. E-mail: d.pustovoytov@magtu.ru.

Пивоварова Ксения Григорьевна – канд. техн. наук, доцент кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: 29-85-12. E-mail: k.pivovarova@magtu.ru.

Тандон Пунит – PhD, профессор, Индийский институт информационных технологий, проектирования и производства, Джабалпур. Тел.: 91-761-2794411. E-mail: puneet.tandon01@gmail.com.

Кожемякина Анна Евгеньевна – аспирант кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», Магнитогорск, Россия. Тел.: 29-85-25. E-mail: kozehmiakina.a@yandex.ru.

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

FEATURES OF ACCUMULATIVE ROLL BONDING OF MULTILAYER METAL MATERIALS

Pesin Alexander M. – Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Department of materials processing technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Tel. 29-85-25. E-mail: a.pesin@magtu.ru.

Pustovoitov Denis O. – Ph. D (Eng.), associate Professor of the Department of materials processing technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia; Tel. 29-85-25. E-mail: d.pustovoytov@magtu.ru.

Pivovarova Ksenia G. – Ph. D (Eng.), associate Professor of the Department of materials processing technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Tel. 29-85-12. E-mail: k.pivovarova@magtu.ru.

Tandon Punit – PhD, Professor; Indian Institute of Information Technology, Design and Manufacturing, Jabalpur, India. Tel. 91-761-2794411. E-mail: puneet.tandon01@gmail.com.

Kozhemiakina Anna E. – Postgraduate student of the Department of materials processing technologies, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. Tel. 29-85-25. E-mail: kozehmiakina.a@yandex.ru.

***Abstracts.** One of the key areas of scientific and technical progress is the development of intelligent production technologies for creating new metal materials with improved mechanical and functional properties for innovative applications in the automotive, military and other industries. Promising in this area are technologies based on the use of methods of intensive plastic deformation, among which we can distinguish accumulative roll bonding. Its advantages are the simplicity of the process, relatively affordable and inexpensive equipment, high productivity and continuous production, which leads to an increase in the industrial capabilities of the process. However, despite the variety of known methods of accumulative roll bonding and the high efficiency of some of them, there are problems associated with uneven deformation during rolling and insufficient strength of the connection of layers. To increase the efficiency of the accumulative roll bonding process, it is proposed to roll multilayer metal materials using asymmetry.*

***Keywords:** multilayer metal material, severe plastic deformation, accumulative roll bonding, asymmetric rolling, pilot rolling mill*

Ссылка на статью:

Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Пивоварова К.Г., Тандон П., Кожемякина А.Е. Особенности процесса аккумулирующей прокатки многослойных металлических материалов // Теория и технология металлургического производства. 2020. №3(34). С. 31-36.

Pesin A.M., Pustovoitov D.O., Pivovarova K.G., Tandon P., Kozhemiakina A.E. Features of accumulative roll bonding of multilayer metal materials. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2020, vol. 34, no. 3, pp. 31-36.