

УДК 621.771

Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Бирюкова О.Д., Носов Л.В., Пивоварова К.Г., Песин И.А.

РАЗРАБОТКА РАЦИОНАЛЬНЫХ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ОБРАБОТКИ ЛИСТОВЫХ СЛОИСТЫХ АЛЮМИНИЕВЫХ КОМПОЗИТОВ 5083/1070 И 5083/2024

Аннотация. На сегодняшний день листовые слоистые композиты набирают популярность при производстве ответственных деталей и конструкций в различных отраслях промышленности. В статье рассмотрены листовые слоистые композиты, изготовленные из алюминиевых сплавов 5082/1070 и 5083/2024. Среди процессов, которые позволяют достигнуть высоких значений механических свойств в длинномерной продукции, одним из перспективных методов является асимметричная аккумулярующая прокатка. В статье приведены рациональные технологические схемы и режимы асимметричной аккумулярующей прокатки листовых слоистых алюминиевых композитов для их использования в космической и автомобильной отраслях. Разработано новое техническое решение, заключающееся в формировании трапецевидного или зубчатого рельефа для исключения смещения слоёв относительно друг друга в очаге деформации и улучшения прочности соединения при асимметричной аккумулярующей прокатке.

Ключевые слова: алюминиевый сплав, листовые слоистые алюминиевые композиты, аккумулярующая прокатка, мозаклинивающееся соединение слоёв, механические свойства

Введение

В современном мире повышается интерес к использованию листовых слоистых композитов в различных отраслях производства. В отличие от однослойных, слоистые материалы являются более прочным, коррозионностойким и технологичным сырьем для производства деталей различного назначения. В статье рассматриваются листовые слоистые композиты, изготовленные из алюминиевых сплавов. Алюминий – это уникальный материал, который при комнатной температуре обладает высокими значениями пластичности и коррозионной стойкости. При значительных отрицательных температурах пластичность, также как и прочность, возрастает. Данные характеристики позволяют широко использовать алюминиевую продукцию в ответственных конструкциях [1, 2].

Листовые слоистые алюминиевые композиты 5083/1070 предназначены для использования в космической отрасли, а именно для производства топливных баков ракет-носителей и космических кораблей для окислителя и горючего сжиженного водородного топлива. Сейчас в качестве основных материалов для производства корпусов топливных баков ракет-носителей используются алюминиевые сплавы, легированные либо магнием, либо литием (например, чаще всего АМг5, АМг6 или 1201, 1421, 1469, 8090 в некоторых конструкциях и т.д.). Данная продукция изготавливается по ГОСТ 21631-76, ГОСТ 4784-97, EN 515, EN 573-3, EN485-1,2,4. Толщина топливных баков, в зависимости от вида ракеты-носителя или космического корабля, может варьироваться от 0,4 до 2,5 мм, ширина поставляемой продукции зависит от формируемого диаметра бака и не превышает 2000 мм. Предлагаемые толщины бака составляют 0,7 – 1,5 мм. Известно, что в России ведется разработка двигателей для ракет-носителей и космических кораблей, работающих на водородном топливе. Однако существующие материалы, из кото-

рых изготавливается корпус бака, достаточно сильно подвергаются водородной коррозии. Это отражается на стойкости агрегатов хранения, взрывоопасности объектов из-за их охрупчивания водородом. Сочетание 5xxx и 1xxx серий позволит, с одной стороны, получить достаточный уровень прочности (соответствующий установленной нормативной документацией), с другой – позволит использовать водородное топливо в качестве горючего, так как алюминиевые сплавы 1xxx серии (в данном случае сплав 1070) практически не подвергаются коррозии при взаимодействии с водородом.

Листовые слоистые алюминиевые композиты 5083/2024 предназначены для производства габаритных частей кузова легкового автомобиля (капот, крылья, крыша, двери, днище). В настоящее время в качестве конструкционного материала для автомобилестроения используются однослойные алюминиевые сплавы 5xxx и 6xxx серий (например, 5182, 6016 и т.д., изготавливаемые по ГОСТ 21631-76, ГОСТ 4784-97, EN 515, EN 573-3, EN 485-1,2,4 и т.д.), которые постепенно приходят на смену стальным материалам. Однако алюминиевые сплавы, применяемые в автомобилестроении, не обладают высокими значениями прочностных характеристик. Главная цель замены существующей алюминиевой продукции на листовую слоистый алюминиевый композит 5083/2024 заключается в первую очередь в повышении уровня прочностных характеристик. Исходя из этого, повысится эксплуатационная безопасность, кроме того, при высоком уровне прочностных характеристик снизится вероятность появления небольших повреждений после незначительных аварий. Сочетание 5xxx и 2xxx серии позволит получить удовлетворительное качество поверхности за счёт сплава 5083, сплав 2024 может применяться в конструкциях, в которых требуется высокое значение коэффициента вязкостного разрушения, более того, в совокупности они лучше выдерживают эксплуатационные нагрузки [3]. Толщина производимой продукции составит 0,7–1,5 мм, ширина не более 1800 мм.

© Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Бирюкова О.Д., Носов Л.В., Пивоварова К.Г., Песин И.А., 2022

Так как продукция из листовых слоистых алюминиевых композитов предназначена для производства ответственных деталей и конструкций, это обуславливает постоянное повышение требований к качеству алюминиевой металлопродукции. Основной упор при этом делается на разработку и совершенствование технологии обработки данной продукции для повышения механических характеристик: получения высоких показателей прочности, твёрдости и удельного значения пластичности.

Технологические разработки и результаты

Асимметричная аккумулярирующая прокатка представляет собой большой интерес в качестве одного из методов интенсивной пластической деформации, с помощью которого при нужном количестве циклов возможно получить ультрамелкозернистую структуру благодаря аккумуляции напряжений после каждого цикла обработки. Большой плюс процесса состоит в том, что можно использовать разнородные материалы в качестве исходных заготовок и получать свойства, присущие как первому, так и второму сплаву.

Важно отметить, что при получении слоистого композита большую роль играет образование качественного шва. Известно, что в результате аккумулярирующей прокатки листы между собой соединяются за счет диффузионных взаимодействий, которые вызывают впоследствии измельчение микроструктуры обрабатываемого металла [4-8]. В работе предлагается новое техническое решение, заключающееся в создании прочного самозаклинивающегося соединения на контактирующих поверхностях [9]. Сущность предлагаемого способа получения слоистого проката состоит в следующем. Перед сборкой пакета осуществляют механическую обработку контактирующих между собой поверхностей заготовок, входящих в пакет, с формированием рельефа контактирующих поверхностей (рис. 1). Затем осуществляют сборку пакета, состоящего из

нескольких заготовок, совместную прокатку пакета за один проход с обжатием до 80% и термообработку. Данное решение помогает исключить смещение слоев относительно друг друга в очаге деформации, частичное сваривание и заворот передней части заготовки по типу дефекта «серповидность», улучшает плотность соединения между слоями.

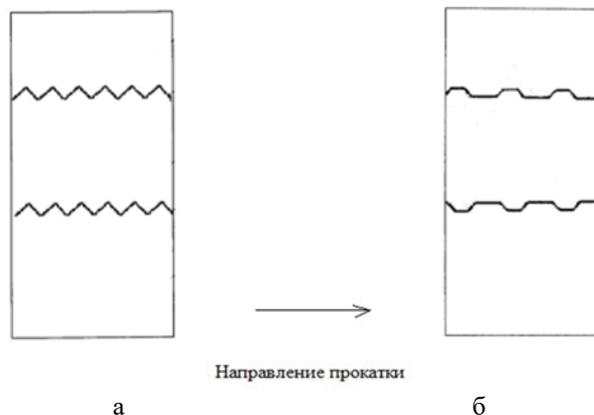


Рис. 1. Виды формируемого рельефа: а – зубчатый рельеф; б – трапециевидный рельеф

Технологическая схема производства листового слоистого алюминиевого композита 5083/1070 для топливных баков ракет-носителей представлена на рис. 2.

Технологическая схема включает в себя несколько этапов:

1. Проведение первого цикла асимметричной аккумулярирующей прокатки при использовании алюминиевых сплавов 5xxx серии с предварительной зачисткой поверхности металлическими щётками и осуществлением сварки полос давлением с последующей смоткой в рулон.

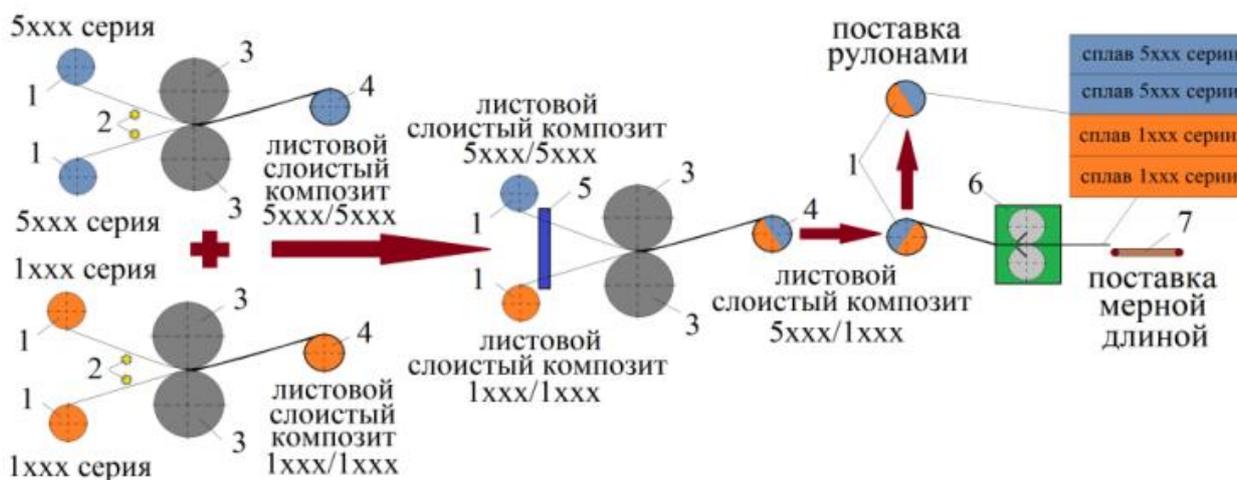


Рис. 2. Технологическая схема процесса производства алюминиевых листовых слоистых композитов (на примере 5xxx и 1xxx серий):

1 – разматыватели; 2 – щётки; 3 – валки; 4 – моталка; 5 – печь; 6 – ножницы; 7 – транспортер листов

2. Проведение первого цикла асимметричной аккумуляющей прокатки при использовании алюминиевых сплавов 1xxx серии с предварительной зачисткой поверхности металлическими щётками и осуществлением сварки полос давлением с последующей смоткой в рулон.

3. Проведение второго цикла асимметричной аккумуляющей прокатки при использовании алюминиевых слоистых композитов 1xxx и 5xxx серий, полученных после первого цикла прокатки, с предварительным нагревом металла в печи и осуществлением сварки полос давлением с последующей смоткой в рулон.

4. Порезка слоистого композита 5xxx/1xxx для получения мерной длины при необходимости (алюминиевого листового слоистого композита 5xxx/1xxx).

В зависимости от требуемых свойств количество циклов может варьироваться.

По результатам исследований [1] предлагаются следующие технологические режимы асимметричного деформирования листового слоистого алюминиевого композита 5083/1070:

1) В качестве материала использовать алюминиевые сплавы 1070 и 5083, из которых составляется листовой слоистый алюминиевый композит 5083/1070.

2) Общая толщина исходного листового слоистого алюминиевого композита может варьироваться от 2 до 4 мм.

3) Толщина каждого отдельного слоя листового слоистого алюминиевого композита может варьироваться от 1 до 2 мм.

4) Обжатие в первом цикле прокатки $\varepsilon = 50\text{--}67\%$.

5) Обжатие во втором цикле прокатки $\varepsilon = 50\text{--}67\%$.

6) Радиус рабочих валков 170 – 250 мм.

7) Значение отношения скоростей установить:

– не менее 1,25 – для заготовок толщиной 2 мм при обжатии 50–57%;

– не менее 1,7 – для заготовок толщиной 2 мм при обжатии 58–67%;

– не менее 1,7 – для заготовок толщиной 3 мм при обжатии 50–57%;

– не менее 2 – для заготовок толщиной 3 мм при обжатии 58–67%;

– не менее 2 – для заготовок толщиной 4 мм при обжатии 50–57%;

– не менее 2,5 – для заготовок толщиной 4 мм при обжатии 58–67%.

8) Коэффициент трения f минимально принять 0,2, получаемый путём предварительной прокатки алюминиевых листов.

9) Предварительно подготавливать поверхность металлов перед соединением зачисткой металлическими щётками и обезжириванием при холодном деформировании.

10) Температура нагрева в печи при тёплом деформировании 380°C.

11) Время выдержки в печи перед процессом тепловой прокатки 5–8 мин.

12) Минимальное количество проходов – 2.

При данных параметрах прокатки в представленном композите будут появляться большие сдвиговые деформации, поэтому такое асимметричное деформирование будет способствовать повышению прочности (табл. 1). При этом температура деформационного разогрева не достигнет критического значения температуры.

Таблица 1

Сравнительные характеристики сплавов 1070, 5083 с полученным листовым слоистым алюминиевым композитом 5083/1070

Сплав	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %	НВ, ед.
5083	140	280	16	65
1070	–	60	20	25
5083/1070	210	304	10	132/65

Технологическая схема производства листового слоистого алюминиевого композита 5083/2024 для габаритных частей кузова автомобиля, представленная на рис. 3, включает следующие этапы:

1. Проведение первого цикла асимметричной аккумуляющей прокатки (дважды) при использовании алюминиевых сплавов 5xxx и 2xxx с предварительным нагревом металла в печи и осуществлением сварки полос давлением с последующей смоткой в рулон.

2. Проведение второго цикла асимметричной аккумуляющей прокатки при использовании алюминиевых слоистых композитов 5xxx/2xxx, полученных после первого цикла прокатки, с предварительным нагревом металла в печи и осуществлением сварки полос давлением с последующей смоткой в рулон.

3. Порезка слоистого композита 5xxx/2xxx для получения мерной длины при необходимости (алюминиевого листового слоистого композита 5xxx/2xxx).

По результатам исследований [1] предлагаются следующие технологические режимы асимметричного деформирования листового слоистого алюминиевого композита 5083/2024:

1) В качестве материала использовать алюминиевые сплавы 2024 и 5083, из которых составляется листовой слоистый алюминиевый композит 5083/2024.

2) Общая толщина исходного листового слоистого алюминиевого композита может варьироваться от 2 до 4 мм.

3) Толщина каждого отдельного слоя листового слоистого алюминиевого композита может варьироваться от 1 до 2 мм.

4) Обжатие в первом цикле прокатки $\varepsilon = 50\text{--}65\%$.

5) Обжатие во втором цикле прокатки $\varepsilon = 50\text{--}60\%$.

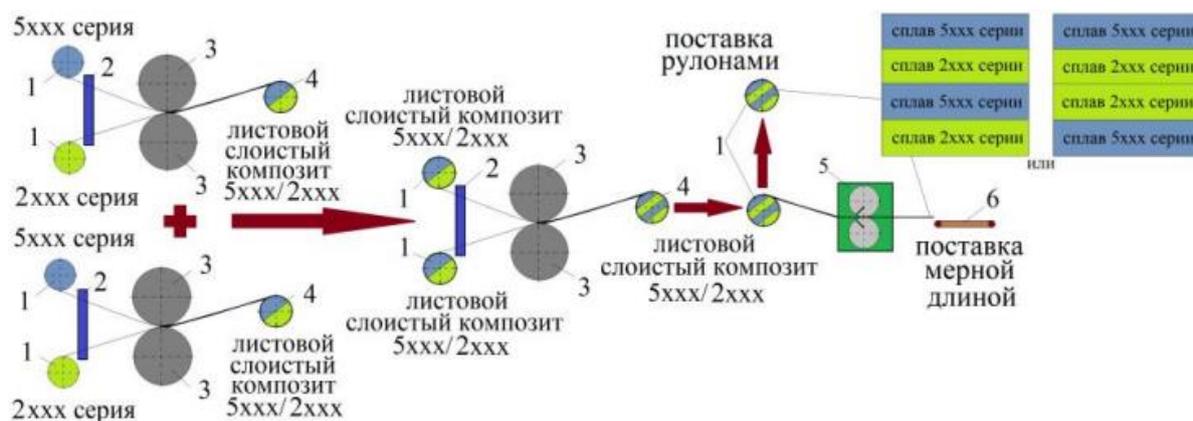


Рис. 3. Схема технологического процесса производства алюминиевых листовых слоистых композитов (на примере 5xxx и 2xxx серий):

1 – размотыватели; 2 – печь; 3 – валки; 4 – моталка; 5 – ножницы; 6 – транспортер листов

6) Радиус рабочих валков 170–250 мм.

7) Значение отношения скоростей установить:

- не менее 1,7 – для заготовок толщиной 2 мм при обжатии 50–56%;
- не менее 2 – для заготовок толщиной 2 мм при обжатии 57–65%;
- не менее 2 – для заготовок толщиной 3 мм при обжатии 50–56%;
- не менее 2,5 – для заготовок толщиной 3 мм при обжатии 57–65%;
- не менее 2,5 – для заготовок толщиной 4 мм при обжатии 50–56%;
- не менее 3,3 – для заготовок толщиной 4 мм при обжатии 57–65%.

8) Коэффициент трения f минимально принять 0,3, получаемый путём предварительной прокатки алюминиевых листов.

9) Температура нагрева в печи при тёплом деформировании 380°C.

10) Время выдержки в печи перед процессом теплой прокатки 15 мин перед первым циклом, 8–10 мин – перед вторым циклом.

11) Минимальное количество проходов – 2.

В табл. 2 представлены характеристики исходных материалов (сплавов 5083 и 2024), а также листового слоистого алюминиевого композита 5083/2024.

Таблица 2

Сравнительные характеристики сплавов 2024, 5083 с полученным листовым слоистым алюминиевым композитом 5083/2024

Сплав	σ_T , МПа	σ_B , МПа	δ , %	НВ, ед.
5083	140	280	16	65
2024	120	235	9	42
5083/2024	215	333	12	130/106

Полученные результаты указывают на то, что предлагаемые технологические схемы асимметричной

аккумулирующей прокатки позволяют обеспечить достижение одновременно высоких прочности и технологической пластичности листовых слоистых алюминиевых композитов за счет создания больших сдвиговых деформаций [2, 10, 11].

Заключение

Разработаны рациональные технологические режимы для обработки листовых слоистых алюминиевых композитов 5083/1070 и 5083/2024, включающие схемы технологического процесса производства мерной длины и рулонов. Данные режимы предполагают установку основных параметров процесса асимметричной аккумулярующей прокатки, в том числе определенные марки, используемые для производства листовых слоистых алюминиевых композитов (1070, 2024 и 5083), толщины исходных заготовок (от 2 до 4 мм), обжатия в первом и втором цикле (от 50 до 67%), значения отношения скоростей валков (в диапазоне 1,25–4), предварительную подготовку поверхности заготовок, режимы термической обработки (зависит от вида листового слоистого алюминиевого композита) и количество циклов.

Предложено новое техническое решение, заключающееся в создании прочной самозаклинивающейся системы в месте соединения слоев композита.

Благодарность

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-19-20073, <https://rscf.ru/project/22-19-20073/> и финансовой поддержки Челябинской области.

Список литературы

1. Бирюкова А.Д. Совершенствование процесса асимметричной аккумулярующей прокатки для улучшения механических свойств в листовых слоистых алюминиевых композитах: дис. ... канд. техн. наук. Магнитогорск, 2022. 143 с.

2. Возможности получения градиентной структуры при асимметричном деформировании алюминиевого слоистого композита / О.Д. Бирюкова, Д.О. Пустовойтов, А.М. Песин, А.Е. Кожемякина // Теория и технология металлургического производства. 2021. №2(37). С. 38-46.
3. Гуреева М.А., Грушко О.Е. Алюминиевые сплавы в сварных конструкциях современных транспортных средств // Машиностроение и инженерное образование. 2009. №1. С. 27-41.
4. Ершов А.А., Сычева Т.А., Засуха П.Ф. Исследование реакционной диффузии в трехслойном биметалле алюминий-латунь // Металловедение и термическая обработка металлов. 1977. № 5. С. 19-22.
5. Alizadeh M. Strength prediction of the ARBed Al/Al₂O₃/B₄C nanocomposites using Orowan model // Materials Research Bulletin. 2014. Vol. 59. Pp. 290-294.
6. Jamaati R. Effect of particle size on microstructure and mechanical properties of composites produced by ARB process // Materials Science and Engineering a-Structural Materials Properties Microstructure and Processing. 2011. Vol. 528. Pp. 2143-2148.
7. Bagherpour E.M. Tailoring particle distribution non-uniformity and grain refinement in nanostructured metal matrix composites fabricated by severe plastic deformation (SPD): a correlation with flow stress // Journal of Materials Science. 2017. Vol. 52. Pp. 3436-3446.
2. Ghalandari L. High-strength and high-conductive Cu/Ag multilayer produced by ARB // Journal of Alloys and Compounds. 2010. Vol. 506. Pp. 172-178.
3. Пат. 2762696 РФ, МПК В32В 7/02, В23К 20/04. Способ получения слоистого проката / А.М. Песин, А.Я. Белов, Е. Пастернак и др.; заявитель и патентообладатель ФГБОУ ВО «МГТУ им. Г.И. Носова» (RU). 2021101410; заявл. 22.01.2021; опубл. 22.12.2021. Бюл. № 36.
4. Obtaining laminated aluminum composites with a gradient structure based on asymmetric deformation / О. Biryukova, А. Pesin, D. Pustovoitov, А. Kozhemiakina, L. Nosov // Metal. 2021. Pp. 496-501.
5. Асимметричная прокатка листов и лент: история и перспективы развития / А.М. Песин, Д.О. Пустовойтов, О.Д. Бирюкова, А.Е. Кожемякина // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». 2020. Т. 20. № 3. С. 81-96.

Сведения об авторах

Песин Александр Моисеевич – доктор технических наук, профессор кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: pesin@bk.ru

Пустовойтов Денис Олегович – кандидат технических наук, доцент кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: d.pustovoytov@magtu.ru

Бирюкова Олеся Дмитриевна – инженер лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева», ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: fimapatisonchik@inbox.ru

Носов Леонид Васильевич – аспирант кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: nosov.leopard@yandex.ru

Пивоварова Ксения Григорьевна – доктор технических наук, доцент кафедры технологий обработки материалов, ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: k.pivovarova@magtu.ru

Песин Илья Александрович – кандидат технических наук, младший научный сотрудник лаборатории «Механика градиентных наноматериалов им. А.П. Жилиева», ФГБОУ ВО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова», г. Магнитогорск, Россия. E-mail: Пуа33392@bk.ru

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

DEVELOPMENT OF RATIONAL TECHNOLOGICAL MODES OF PROCESSING SHEET LAMINATED ALUMINUM COMPOSITES 5083/1070 AND 5083/2024

Pesin Alexander M. – D.Sc. (Eng.), Professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University. Magnitogorsk, Russia. E-mail: pesin@bk.ru

Pustovoitov Denis O. – Ph.D. (Eng.), the associate professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: d.pustovoytov@magtu.ru

Biryukova Olesya D. – Engineer, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: fimapatisationchik@inbox.ru

Nosov Leonid V. – Postgraduate student, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: nosov.leopold@yandex.ru

Pivovarova Ksenia G. – D.Sc. (Eng.), the associate professor, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: k.pivovarova@magtu.ru

Pesin Ilya A. – Ph.D. (Eng.), Junior Researcher, Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russia. E-mail: Ilya33392@bk.ru

Annotation. Sheet layered composites are gaining popularity in the production of critical parts and structures in various industries. The article considers sheet layered composites made of aluminum alloys 5082/1070 and 5083/2024. Among the processes that make it possible to achieve high values of mechanical properties in long products, one of the promising methods is asymmetric accumulating rolling. The article presents rational technological schemes and modes of asymmetric accumulating rolling of sheet laminated aluminum composites for their use in the space and automotive industries. A new technical solution has been developed, which consists in the formation of a trapezoidal or toothed relief to eliminate the displacement of layers relative to each other in the focus of deformation and to improve the strength of the joint during asymmetric accumulating rolling.

Keywords: aluminum alloy, sheet layered aluminum composites, accumulating rolling, interlocking connection of layers, mechanical properties

Ссылка на статью:

Разработка рациональных технологических режимов обработки листовых слоистых алюминиевых композитов 5083/1070 и 5083/2024 / Песин А.М., Пустовойтов Д.О., Бирюкова О.Д., Носов Л.В., Пивоварова К.Г., Песин И.А. // Теория и технология металлургического производства. 2022. №4(43). С. 43-48.

Pesin A.M., Pustovoitov D.O., Biryukova O.D., Nosov L.V., Pivovarova K.G., Pesin I.A. Development of rational technological modes of processing sheet laminated aluminum composites 5083/1070 and 5083/2024. *Teoria i tehnologia metallurgiceskogo proizvodstva*. [The theory and process engineering of metallurgical production]. 2022, vol. 43, no. 4, pp. 43-48.