

Оригинальная статья

УДК 621.7.04

DOI: 10.57070/2304-4497-2024-2(48)-94-102

**ИССЛЕДОВАНИЕ ИЗМЕНЕНИЯ ТОЛЩИНЫ ОТДЕЛЬНЫХ СЛОЕВ ПРИ
СБОРКЕ ПЯТИСЛОЙНОГО ОБРАЗЦА ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ**

© 2024 г. Е. А. Носова, А. С. Нешин

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева (Россия, 443086, Самарская обл., Самара, ул. Московское шоссе, 34)

Аннотация. Развитие инновационной техники, прежде всего авиационно-космической, заставляет перейти от монометаллов к слоистым и многослойным материалам, сочетание различных металлов или сплавов могут обеспечить повышение эксплуатационных свойств и создание новых приборов и изделий. Алюминиево-литиевые сплавы обладают превосходными механическими, эксплуатационными и антикоррозионными свойствами, которые позволяют им конкурировать с традиционными сплавами, в том числе с полимерными композиционными материалами. Они являются привлекательными материалами для получения слоистых металлокомпозитов. С помощью холодной продольной прокатки получены образцы пятислойного металлокомпозита из алюминиево-литиевого сплава 1420, дюралюминия Д16 и технически чистого алюминия А0. Представлены фотоизображения макроструктуры полученных многослойных образцов, результаты измерения толщины слоев. По полученным результатам построены графики по изменению деформации слоев. Исследование макроструктуры образцов, полученных чередованием слоев из алюминиевых сплавов 1420 и Д16 со слоями из технического алюминия А0, а также из технического алюминия А0 без применения других сплавов, показало, что положение слоя и свойства материала влияют на степень деформации отдельных слоев. В образцах со сплавами 1420, Д16 и А0 слои алюминия, прилегающие к инструменту, испытывают наименьшую деформацию по сравнению с центральными слоями на первых трех переходах холодной прокатки. По мере увеличения числа проходов (до 5 – 6) степень деформации слоев выравнивается. Толщина внутреннего слоя практически не изменяется вплоть до последней прокатки во всех полученных сочетаниях материалов.

Ключевые слова: пятислойный металлокомпозит, алюминиевые сплавы, неравномерность изменения, толщина слоя, сборка, деформация

Для цитирования: Носова Е.А., Нешин А.С. Исследование изменения толщины отдельных слоев при сборке пятислойного образца из алюминиевых сплавов. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2024;2(48):94–102. [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-2\(48\)-94-102](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-2(48)-94-102)

Original article

**RESEARCH OF THICKNESS OF INDIVIDUAL LAYERS DURING THE ASSEMBLY
OF A FIVE-LAYER ALUMINIUM BASED SAMPLES**

© 2024 E. A. Nosova, A. S. Neshin

Samara National Research University named after Academician S. P. Korolev (34 Moskovskoye shosse, Samara, 443086, Russian Federation)

Abstract. The development of innovative technology, primarily aerospace technology, forces us to move from monometals to layered and multilayer materials, because the combination of various metals or alloys can provide improved performance properties and the creation of new devices and products. Aluminum-lithium alloys have excellent mechanical, performance and anti-corrosion properties, which allow them to compete with traditional alloys, including polymer composite materials. And that is why they are attractive materials

for producing layered metal composites. In this work, using cold longitudinal rolling, samples of a five-layer metal composite from aluminum-lithium alloy 1420, D16 duralumin and commercially pure A0 aluminum were obtained. Photo images of the macrostructure of the obtained multilayer samples and the results of measuring the thickness of the layers are presented. Based on the obtained measurement results, graphs were constructed for changes in the deformation of the layers. A study of the macrostructure of samples obtained by alternating layers of aluminum alloys 1420, D16 with layers of technical aluminum A0, as well as from technical aluminum A0 without the use of other alloys, showed that the position of the layer and the properties of the material affect the degree of deformation of individual layers. In the case of samples with alloys 1420, D16 and A0, the aluminum layers adjacent to the tool experience the least deformation compared to the central layers during the first 3 cold rolling transitions. As the number of transitions increases (to 5 – 6), the degree of deformation of the layers levels out. The thickness of the inner layer remains virtually unchanged until the last rolling in all resulting combinations of materials.

Keywords: five-layer metal composite, aluminum alloys, uneven change, layer thickness, assembly, deformation

For citation: Nosova, E.A., Neshin, A.S Research of thickness of individual layers during the as-sembly of a five-layer aluminium based samples. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2024;2(48):94–102. (In Russ.). [http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-2\(48\)-94-102](http://doi.org/10.57070/2304-4497-2024-2(48)-94-102)

Введение

Слоистые материалы традиционно вызывают интерес у конструкторов перспективных видов техники в связи с их высокими показателями прочности [1; 2], вибростойкости [3], магнитной восприимчивости [3], пожаростойкости [4] и другим [5].

Многослойные материалы и слоистые композиты получают различными методами (совместной прокаткой, аддитивными технологиями, сваркой взрывом). Как правило, соединение отдельных слоев выполняется клеевыми составами или с помощью пластиков [6; 7]. Рассматриваемый способ не требует больших усилий, позволяет экономить дорогостоящие и дефицитные металлы, но требует решения вопросов утилизации отходов и рециклирования материалов, что связано с необходимостью разделения пластиков и металлов, а также раздельными способами их переработки.

Для соединения слоев металла между собой требуется степень деформации не менее 40 %. В этом случае достигается прочность соединения порядка 70 % от прочности металла основы. Применение для соединения слоев сварки взрывом, позволяющей реализовать указанную степень деформации, технологически сложно. Она применяется для ограниченной номенклатуры материалов и полуфабрикатов [8].

В работах [9 – 11] по соединению слоев сталей, медных и алюминиевых сплавов путем совместной прокатки заготовок были получены многослойные материалы и композиты, которые показали уникальные свойства (инварный эффект, высокую прочность и вибрационную стойкость).

Алюминиевые сплавы широко применяются в различных отраслях машиностроения,

авиастроения, ракетно-космической техники, судостроения и других. Существует ряд слоистых металл-полимерных композитов на основе сплавов В95, Д16, 1420, соединенных пластиками типа полиэтилена, полипропилена или их смеси [4; 5; 7], которые рекомендованы для изготовления обшивок и корпусных деталей. В связи с этим, вызывает практический интерес возможность соединения высокопрочных сплавов с помощью пластичного технически чистого алюминия методом совместной прокатки, а также степень деформации слоев для получения гарантированного равномерного строения слоистых образцов. Степень деформации отдельных слоев, необходимая для их соединения, может быть различной для относительно высокопрочных сплавов и менее прочного технического алюминия.

Объектом представленного исследования являлось изучение структуры многослойных и слоистых материалов на основе технического алюминия и алюминиевых сплавов 1420, Д16.

Целью настоящей работы является получение и исследование многослойных алюминиевых сплавов.

Методы и принципы исследования

В ходе настоящей работы были использованы листовые образцы из алюминиево-литиевого сплава 1420, дюралюминия Д16 и технически чистого алюминия А0.

Для изготовления образцов использована прямоугольная труба из технического алюминия шириной 10 мм, внутрь которой вставляли пластины сплава и в середину еще одну пластину алюминия А0 (рис. 1).

Использована холодная продольная прокатка, которую осуществляли в настоящей работе после

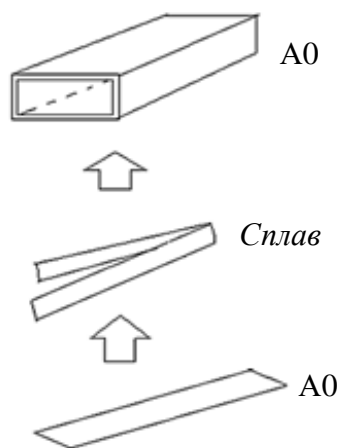


Рис. 1. Схема создания образцов
Fig. 1. Scheme for creating samples

сборки заготовок и проводили при комнатной температуре.

В результате были получены пятислойные образцы со сплавом 1420, Д16 и техническим алюминием А0. Процесс прокатки проведен на прокатном стане ГМ-945.

Образцы подвергали деформации с получением толщин 10 мм → 7 мм → 4 мм → 2 мм → 1 мм. Для оценки степени деформации материала при прокатке использовали относительную деформацию, которую рассчитывали по следующей формуле:

$$\varepsilon = \frac{H_0 - H_1}{H_0} 100 \% ; \quad (1)$$

здесь H_0 и H_1 – начальная и конечная толщина слоя или образца до прохода прокатки.

Относительное обжатие после каждой прокатки составило при $H_1 = 7$ мм $\varepsilon = 30$ %; при $H_1 = 4$ мм $\varepsilon = 42,85$ %; при $H_1 = 2$ мм, $\varepsilon = 50$ %; при $H_1 = 1$ мм, $\varepsilon = 50$ %.

Для восстановления пластичности образцы подвергали отжигу при температуре 480 °С в течение 1 ч [11].

Для изучения неравномерности изменения толщины отдельных слоев после каждого этапа прокатки из заготовок отрезали образцы для изготовления шлифов.

Для изучения макроструктуры образцов применяли USB-камеру Espada U500X с 500-кратным увеличением.

Основные результаты

Макроструктура многослойных образцов представлена в табл. 1.

Анализ строения полученных образцов показывает, что прикладываемое усилие направлено на уменьшение толщины отдельных слоев. На

первых проходах образуется довольно ровное и качественное соединение отдельных слоев, однако неравномерность деформации и наличие различных условий трения на контактных поверхностях приводит к расслоению образцов на последних проходах.


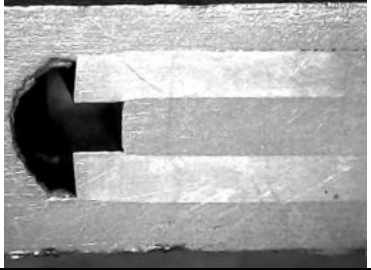



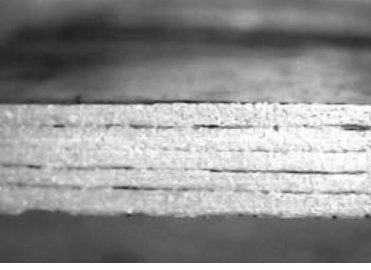

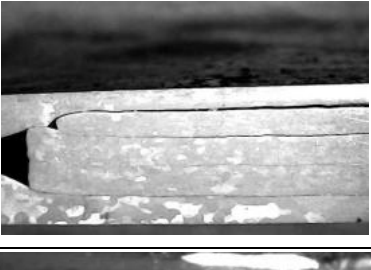

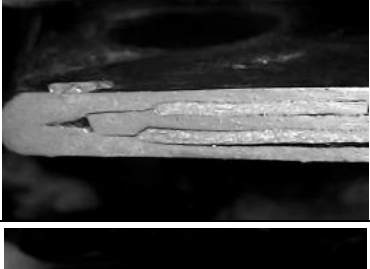

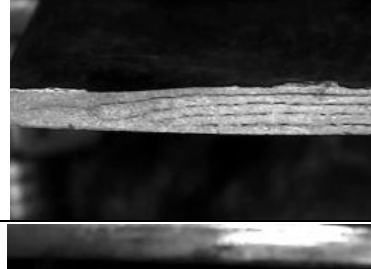


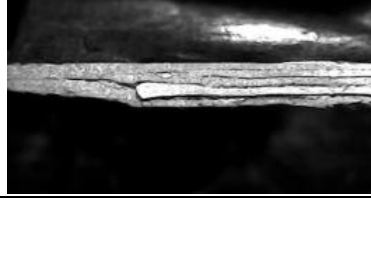
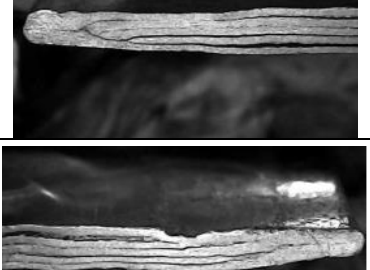
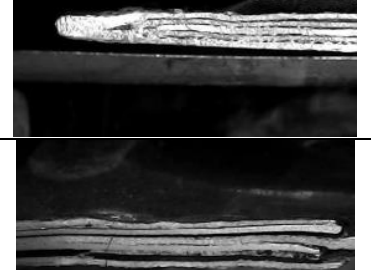


Результаты измерения толщины слоев каждого шлифа представлены в табл. 2. По полученным данным построены графики изменения деформации слоев (рис. 2 – 4), показано изменение степени деформации слоев в зависимости от прохода прокатки.

По мере увеличения обжатия при прокатке толщина отдельных слоев в образце со сплавом 1420 уменьшается (рис. 2, а). При этом деформация наружных и центрального слоев из технического алюминия (рис. 2, б) на первых трех проходах прокатки изменяется немонотонно, даже появляется увеличение толщины наружных слоев, что может быть связано с перекосом валков и их прогибом при прокатке за счет реакции опор и упругой деформации. Начиная с четвертого прохода степень деформации наружных слоев опережает деформацию слоев из сплава 1420 и достигает максимальных значений (51 – 53 %) к 5 – 6 проходам, затем снижается до 18 – 19 %. Деформация центрального слоя достигает максимальных значений (около 60 %) к 3 – 4 проходам и на последующих проходах деформация центрального слоя снижается до 22 – 28 %. Деформация слоев сплава достигает максимальных значений на третьем проходе прокатки и затем снижается.

По мере увеличения обжатия при прокатке толщина отдельных слоев в образце со сплавом Д16 уменьшается (рис. 3, а). Начиная с третьего прохода степень деформации внутренних слоев опережает деформацию наружных слоев и достигает максимальных значений (62 – 65 %) от третьего к четвертому проходу, затем снижается до 20 %. Деформация центрального слоя достигает максимальных значений около 50 % к 3 – 4 проходам и на последующих проходах деформация центрального слоя снижается до 15 – 20 %. Деформация слоев сплава достигает максимальных значений на третьем проходе прокатки и затем снижается до 0 – 20 % к шестому проходу и затем снова возрастает.

В наиболее однородном по составу слоев образце из технического алюминия АД0 (рис. 4) наименьшую деформацию испытывают наружные слои, контактирующие с инструментом до третьего прохода прокатки, затем, на третьем и четвертом проходах общая деформация и деформация наружных слоев находятся примерно на одном уровне, а на пятом и шестом проходах деформация наружных слоев выше, чем общее

Макроструктура образцов (увеличение ×20)
Table 1. Macrostructure of samples (magnitude ×20)

№	Образцы на основе сплава 1420	Образцы на основе сплава Д16	Образцы на основе технически чистого алюминия А0
1			
2			
3			
4			
5			
6			-
7			-

Результаты измерения толщины
Table 2. Results of thickness measurement

№	Толщина слоя, мм				
	Алюминий	Сплав	Алюминий	Сплав	Алюминий
<i>Сплав 1420</i>					
1	1,750	1,750	2,000	1,875	1,625
2	1,625	1,625	1,875	1,5	1,625
3	1,125	0,875	1,125	0,875	1,000
4	0,750	0,625	0,625	0,500	0,500
5	0,375	0,500	0,500	0,500	0,375
6	0,250	0,250	0,375	0,250	0,375
<i>Сплав Д16</i>					
1	1,750	1,750	2,000	1,875	1,625
2	1,750	1,500	2,000	1,625	1,625
3	1,125	1,125	1,125	0,750	0,750
4	0,750	0,625	0,625	0,625	0,750
5	0,625	0,625	0,625	0,500	0,625
6	0,250	0,250	0,375	0,250	0,375
7	0,250	0,250	0,375	0,250	0,250
<i>Алюминий А0</i>					
1	0,875	1,000	1,125	1,125	1,000
2	0,625	0,625	0,625	0,625	0,625
3	0,625	0,500	0,500	0,500	0,625
4	0,375	0,375	0,375	0,250	0,375
5	0,250	0,375	0,375	0,250	0,250

обжатию. Деформация центрального слоя на первых двух проходах прокатки совпадает с общим обжатием, а начиная с третьего прохода деформация центрального слоя меньше общего обжатию. Деформация промежуточного слоя преобладает над общим обжатием образца на втором проходе, но на третьем проходе деформация промежуточного слоя практически отсутствует, к четвертому проходу соответствует общему обжатию; а на последнем проходе меньше общего обжатию.

Обсуждение

Анализ графиков изменения толщины и степени деформации при холодной прокатке пятислойных образцов, состоящих из чередующихся слоев технически чистого алюминия, а также сплавов Д16 и 1420, показывает, что слои воспринимают деформацию с учетом их положения

относительно инструмента и свойств сплавов. Характер изменения степени деформации образцов, имеющих внутри слои более прочных сплавов Д16 и 1420, совпадает (на первых трех проходах общее обжатие и деформация слоев сплавов примерно одинаковые, но начиная с четвертого прохода менее пластичный сплав 1420 [12] деформируется с меньшим обжатием, чем общее обжатие за переход). Тогда деформирование начинает осуществляться в основном за счет наружных слоев из технического алюминия.

В работах [14 – 17] по совместной соединительной прокатке листовых образцов из алюминия и его сплавов показано, что получение многослойных образцов позволяет повысить механические свойства конечного изделия. Однако успешное соединение слоев зависит от многих факторов.

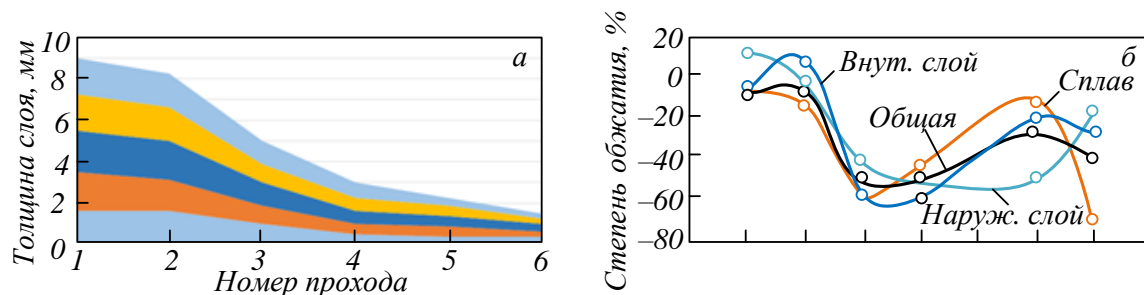


Рис. 2. Изменение толщины (а) и степени деформации (б) слоев образца со сплавом 1420
Fig. 2. Graph of change in thickness (a) and degree of deformation (b) of layers of a sample with alloy 1420

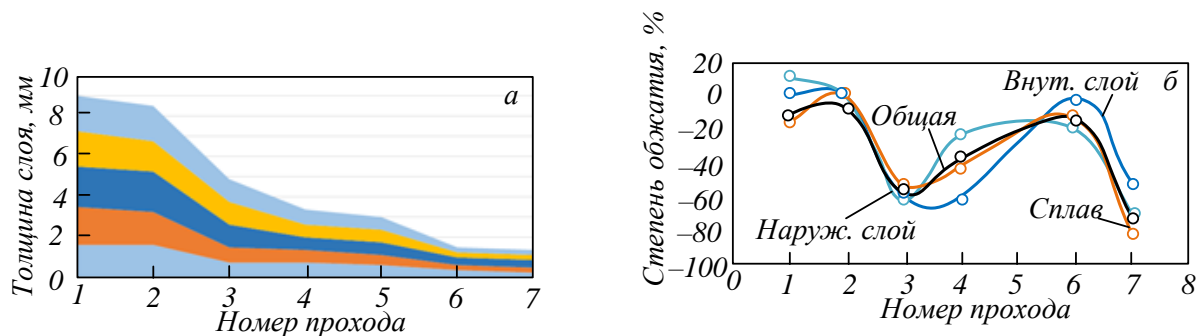


Рис. 3. Изменение толщины (а) и степени деформации (б) слоев образца со сплавом Д16
 Fig. 3. Graph of change in thickness (a) and degree of deformation (б) of layers of a sample with D16 alloy

В работе [14] провели экспериментальные исследования соединительной прокатки листов из алюминиевого сплава АА1060 в условиях вакуума. Результаты экспериментов показали, что при температуре 580 °С и деформации 60 % границы сварки исчезают, а структура матрицы сплава не перегорает. Таким образом, продемонстрировано, что при большой деформации и при кратковременном высоком давлении соединения можно добиться качественного соединения алюминиевых листов, несмотря на наличие оксидной пленки на поверхности исходного листа.

В работе [15] представлены экспериментальные результаты структурных и механических характеристик многослойного композита из технически чистых алюминиевых фольг. Многослойный композит был изготовлен методом горячей прокатки, анодированной и не анодированной алюминиевой фольги, поочередно скрепленной между собой. Кроме того, тот же процесс был применен для склеивания не анодированной фольги. В обоих случаях полученные многослойные композиты оказались компактными и прочными. Твердость, прочность, модуль упругости и прочность на изгиб обоих многослойных композитов были значительно выше, чем у чистого алюминия, тогда как пластичность была существенно меньше. Композит с анодированной фольгой показал самые высокие значения прочности и модуля упругости, но меньшую пластичность по сравнению с композитом,

полученным из не анодированной фольги. Разрушение соответствовало изменению пластичности.

В работе [16] представлена визуализация процесса склеивания металла в трехслойном алюминиевом листе. Показано, что состояние интерфейса между сердечником и двумя боковыми материалами меняется от процесса скольжения к процессу соединения. Оксидные пленки разрушаются и вновь образующиеся поверхности контактируют как при сварке под давлением. Оба профиля поверхности сердечника и двух материалов облицовки деформируются, а во вновь образованных поверхностях получается множество микропустот.

В работе [17] представлен обзор свойств и характеристик композитов из алюминиевых сплавов, полученных с помощью накопительной прокатки. Показано, что структура играет значительную роль в конечном результате, поэтому количество циклов накопительной прокатки, используемые методы, армирование и их распределение, градиция материалов и другие вспомогательные процессы (термическая обработка и т.д.) имеют важное значение и сильное воздействие на полученный материал. Помимо внедрения новых технологий, новые исследования должны быть сосредоточены на адаптации структуры.

В настоящее время активно ведутся научно-исследовательские работы [14 – 17] по повышению качества получения слоистых композитов из алюминиевых сплавов, однако использование

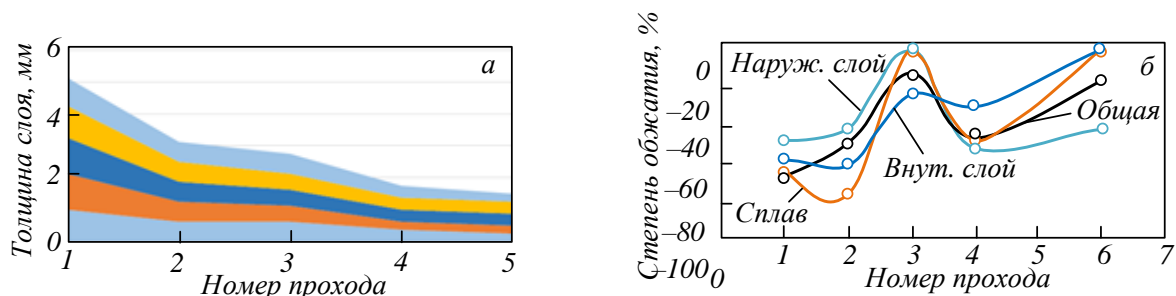


Рис. 4. Изменение толщины (а) и степени деформации (б) слоев образца с технически чистым алюминием А0
 Fig. 4. Graph of change in thickness (a) and degree of deformation (б) of layers of a sample with commercially pure aluminum A0

результатов этих работ не позволяет прогнозировать конечную толщину слоев, которая может оказывать влияние на свойства получаемых материалов. Первоочередными задачами работы является изучение процесса получения и структуры слоистых композитов.

Выводы

Исследование макроструктуры образцов, полученных чередованием слоев из алюминиевых сплавов 1420, Д16 со слоями из технически чистого алюминия, а также из технически чистого алюминия без применения других сплавов, показало, что положение слоя и свойства материала влияют на степень деформации отдельных слоев. В случае образцов с со сплавами 1420, Д16 и А0 слои алюминия, прилегающие к инструменту, испытывают наименьшую деформацию по сравнению с центральными слоями на первых трех проходах холодной прокатки. По мере увеличения числа проходов (до 5 – 6) степень деформации слоев выравнивается. Толщина внутреннего слоя практически не изменяется вплоть до последней прокатки во всех полученных сочетаниях материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Старцев В.О., Антипов В.В., Славин А.В., Горбовец М.А. Современные отечественные полимерные композиционные материалы для авиастроения (обзор). *Авиационные материалы и технологии*. 2023;2(71):122–144. EDN:HBMFBX; <https://doi.org/10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144>
2. Громов В.Е., Коновалов С.В., Чен С., Ефимов М.О., Панченко И.А., Шляров В.В. Вектор развития улучшения свойств ВЭС Кантора. *Вестник Сибирского государственного индустриального университета*. 2023;2(44):3–12. [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2\(44\)-3-12](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2(44)-3-12)
3. Путилина П.М., Куцевич К.Е., Исаев А.Ю. Полимерные композиционные материалы на основе углеродных и стеклянных волокон для изготовления деталей беспилотных летательных аппаратов и перспективы их развития. *Труды ВИАМ*. 2023;8:85–99.
4. Антипов В.В., Сомов А.В., Сидельников В.В., Нефедова Ю.Н., Огурцов П.С., Соловьев В.А. Технологические особенности формообразования огнестойкого легкого слоистого материала для изготовления капота двигателя вертолета. *Авиационные материалы и технологии*. 2023;3(72):90–100.
5. Антипов В.В., Курс М.Г., Гирш Р.И., Серебренникова Н.Ю. Натурные климатические испытания металлополимерных композиционных материалов типа СИАЛ в морском климате. *Авиационные материалы и технологии*. 2019;4(57):56–64.
6. Антипов В.В., Петрова А.П., Козлов И.А., Фомина М.А., Волков И.А. Влияние технологических нагревов и способов подготовки поверхности под склеивание на механические свойства алюминиевой фольги из сплава АМг2Н. *Труды ВИАМ*. 2018;7(67):10–24. EDN: XSNCMP; <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-7-10-24>
7. Глушенков В.А., Палковский Х., Юсупов Р.Ю., Матвеев Д.А. Контроль качества многослойного композиционного материала «металл-неметалл-металл». В кн.: *Современные методы и технологии создания и обработки материалов: сборник научных трудов. Том 1*. Минск. 2020:154–163.
8. Королев М.П., Кузьмин Е.В., Харламов В.О., Кузьмин С.В., Лысак В.И. Влияние термических условий при сварке взрывом титана с алюминиево-магниево-сплавом. *Известия Волгоградского государственного технического университета*. 2023;11(282):16–22. EDN: АТОХЕW.
9. Колесников А.Г., Плохих А.И., Миронова М.О., Шинкарев А.С. Опыт черновой прокатки многослойных листов в капсулах. *Производство проката*. 2016;5:8–12. EDN: VWPWLX.
10. Колесников А.Г., Плохих А.И., Шинкарев А.С., Миронова М.О. Прокатка стального многослойного материала. *Заготовительные производства в машиностроении*. 2013;8:39–42.
11. Колесников А.Г., Мечиев Ш.Т., Панова И.Ю. Состояние и перспективы применения многослойных металлических заготовок. *Заготовительные производства в машиностроении*. 2008;1:42–43. EDN: IJSGWV.
12. Алюминий 1420 // Центральный металлический портал. – URL: https://metallcheckiy-portal.ru/marki_metallov/alu/1420 (дата обращения 10.01.2024).
13. Анисимова Н.В., Арчакова З.Н., Батраков В.П. и др. Алюминиевые и бериллиевые сплавы. *Деформируемые алюминиевые сплавы и сплавы на основе бериллия / Под ред. С.И. Кишкина, И.Н. Фрид Часть 1. Книга 1*. 1982:628.
14. Tan Z., Zhao B., Jiang J., Li Z., Lin J. A study on the hot roll bonding of aluminum alloys. *Procedia Manufacturing*. 2020;50:56–62. <http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2020.08.011>

15. Jovanović M.T., Ilić N., Cvijović-Alagić I., Maksimović V., Zec S. Multilayer aluminum composites prepared by rolling of pure and anodized aluminum foils. *Transactions of Non-ferrous Metals Society of China*. 2017;27(9):1907–1919.
16. Torikai G., Yoshida Y., Asano M., Niikura A. Visualization of metal flow and adhering of aluminum alloy in three-layer clad rolling. *Procedia Manufacturing*. 2018;15:144–151. <http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.188>
17. Ebrahimi M., Wang Q. Accumulative roll-bonding of aluminum alloys and composites: An overview of properties and performance. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022;19:4381–4403. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.06.175>

REFERENCES

1. Startsev V.O., Antipov V.V., Slavin A.V., Gorbovets M.A. Modern domestic polymer composite materials for the aircraft industry (review). *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*. 2023;2(71):122–144. (In Russ.). EDN:HBMFBX; <https://doi.org/10.18577/2713-0193-2023-0-2-122-144>
2. Gromov V.E., Konovalov S.V., Chen S., Efimov M.O., Panchenko I.A., Shlyarov V.V. The vector of development of improving the properties of the Cantor wind farm. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2023;2(44):3–12. (In Russ.). [https://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2\(44\)-3-12](https://doi.org/10.57070/2304-4497-2023-2(44)-3-12)
3. Putilina P.M., Kutsevich K.E., Isaev A.Yu. Polymer composite materials based on carbon and glass fibers for the manufacture of parts of unmanned aerial vehicles and prospects for their development. *Trudy VIAM*. 2023;8:85–99. (In Russ.).
4. Antipov V.V., Somov A.V., Sidel'nikov V.V., Nefedova Yu.N., Ogurtsov P.S., Solov'ev V.A. Technological features of forming a fire-resistant lightweight laminated material for the manufacture of a helicopter engine hood. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*. 2023;3(72):90–100. (In Russ.).
5. Antipov V.V., Kurs M.G., Girsh R.I., Serebrennikova N.Yu. Full-scale climatic tests of metal polymer composite materials of the SIAL type in the marine climate. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*. 2019;4(57):56–64. (In Russ.).
6. Antipov V.V., Petrova A.P., Kozlov I.A., Fomina M.A., Volkov I.A. The effect of technological heating and methods of surface preparation for bonding on the mechanical properties of aluminum foil made of AMg2H alloy. *Trudy VIAM*. 2018;7(67):10–24. (In Russ.). EDN: XSNCMP; <https://doi.org/10.18577/2307-6046-2018-0-7-10-24>
7. Glushchenkov V.A., Palkovskii Kh., Yusupov R.Yu., Matveev D.A. Quality control of multi-layer composite material "metal-nonmetal-metal". In: *Modern methods and technologies of creation and processing of materials: a collection of scientific papers. Volume 1*. Minsk. 2020:154–163. (In Russ.).
8. Korolev M.P., Kuz'min E.V., Kharlamov V.O., Kuz'min S.V., Lysak V.I. The influence of thermal conditions during explosion welding of titanium with aluminum-magnesium alloy. *Izvestiya Volgogradskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*. 2023;11(282):16–22. (In Russ.). EDN: ATOXEW.
9. Kolesnikov A.G., Plokhikh A.I., Mironova M.O., Shinkarev A.S. The experience of rough rolling of multilayer sheets in capsules. *Proizvodstvo prokatta*. 2016;5:8–12. EDN: VWPWLX. (In Russ.).
10. Kolesnikov A.G., Plokhikh A.I., Shinkarev A.S., Mironova M.O. Rolling of multilayer steel material. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*. 2013;8:39–42. (In Russ.).
11. Kolesnikov A.G., Mechiev Sh.T., Panova I.Yu. The state and prospects of application of multi-layer metal workpieces. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*. 2008;1:42–43. EDN: IJSGWV. (In Russ.).
12. Aluminum 1420 // Central metal portal. Available at URL: https://metallischekiy-portal.ru/marki_metallov/alu/1420 (Accessed 10.01.2024). (In Russ.).
13. Anisimova N.V., Archakova Z.N., Batrakov V.P., etc. Aluminum and beryllium alloys. *Deformable aluminum alloys and beryllium-based alloys / Edited by S. I. Kishkin, I. N. Fried Part 1. Book 1*. 1982:628. (In Russ.).
14. Tan Z., Zhao B., Jiang J., Li Z., Lin J. A study on the hot roll bonding of aluminum alloys. *Procedia Manufacturing*. 2020;50:56–62. <http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2020.08.011>
15. Jovanović M. T., Ilić N., Cvijović-Alagić I., Maksimović V., Zec S. Multilayer aluminum composites prepared by rolling of pure and anodized aluminum foils. *Transactions of Non-ferrous Metals Society of China*. 2017;27(9):1907–1919.
16. Torikai G., Yoshida Y., Asano M., Niikura A. Visualization of metal flow and adhering of aluminum alloy in three-layer clad rolling. *Procedia Manufacturing*. 2018;15:144–151. <http://dx.doi.org/10.1016/j.promfg.2018.07.188>
17. Ebrahimi M., Wang Q. Accumulative roll-bonding of aluminum alloys and composites: An overview of properties and performance.

Journal of Materials Research and Technology. 2022;19:4381–4403.
<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2022.06.175>

Сведения об авторах:

Екатерина Александровна Носова, д.т.н., доцент, заведующий кафедрой технологии металлов и авиационного материаловедения, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева

E-mail: nosova.ea@ssau.ru

ORCID: 0000-0002-5490-3235

SPIN-код: 7286-4426

Артем Сергеевич Нешин, аспирант кафедры технологии металлов и авиационного материаловедения, Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева

E-mail: claniast163@gmail.com

ORCID: 0000-0002-7250-7068

Information about the authors:

Ekaterina A. Nosova, Dr.Sci.(Eng)., Associate Professor, Head of the Department of Metal Technology and

Aviation Materials Science, Samara National Research University named after Academician S. P. Korolev

E-mail: nosova.ea@ssau.ru

ORCID: 0000-0002-5490-3235

SPIN-код: 7286-4426

Artem S. Neshin, graduate student of the Department of Metal Technology and Aviation Materials Science, Samara National Research University named after Academician S. P. Korolev

E-mail: claniast163@gmail.com

ORCID: 0000-0002-7250-7068

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare that there is no conflict of interest.

Поступила в редакцию 07.02.2024

После доработки 14.02.2024

Принята к публикации 19.02.2024

Received 07.02.2024

Revised 14.02.2024

Accepted 19.02.2024