

Научная статья  
УДК 539.3  
DOI: [10.34759/trd-2022-124-05](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-05)

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПРОКАТА В СЛОЯХ АЛЮМОСТЕКЛОПЛАСТИКА НА СТАТИЧЕСКИЕ И ДИНАМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА

Лев Наумович Рабинский<sup>1</sup>, Арсений Владимирович Бабайцев<sup>2</sup>,

Павел Сергеевич Шестеркин<sup>3</sup>✉

<sup>1,2,3</sup>Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), Москва, Россия

<sup>3</sup>[blackshoot.92@mail.ru](mailto:blackshoot.92@mail.ru)✉

**Аннотация.** Повышение прочностных характеристик и уменьшение веса конструкции является важнейшей проблемой в авиастроении. Но по мере увеличения прочности конструкционного материала происходит снижение его пластичности, увеличивается возможность хрупкого разрушения. Данный факт существенно ограничивает использование высокопрочных материалов в авиастроении. Одним из вариантов удовлетворяющим описанные выше требованиям являются алюмокомпозиты. Данная работа посвящена исследованию влияния проката в алюминиевых слоях алюмокомпозита. В частности, проводилось исследование статических и динамических свойств вдоль и поперек проката.

**Ключевые слова:** алюмокомпозит, статические свойства, испытание на растяжение, динамические свойства, коэффициент демпфирования

**Финансирование:** работа выполнена с финансовой поддержкой гранта Президента Российской Федерации МК-398.2022.4.

**Для цитирования:** Рабинский Л.Н., Бабайцев А.В., Шестеркин П.С. Исследование влияния проката в слоях алюмокомпозита на статические и динамические свойства // Труды МАИ. 2022. № 124. DOI: [10.34759/trd-2022-124-05](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-05)

## INVESTIGATION OF THE EFFECT OF ROLLED PRODUCTS IN LAYERS OF ALUMINUM-FIBERGLASS ON STATIC AND DYNAMIC PROPERTIES

Lev N. Rabinsky<sup>1</sup>, Arseniy V. Babaitsev<sup>2</sup>, Pavel S. Shesterkin<sup>3</sup>✉

<sup>1,2,3</sup>Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia

<sup>1</sup>[blackshoot.92@mail.ru](mailto:blackshoot.92@mail.ru)✉

**Abstract.** The composite materials is a new invention of the material combination which can be used in the aircraft industry. The main purpose of the invention is to have the lightweight structure and anti-corrosion effect with better strength. This type of materials is hybrid because of the combination of the metal and fiberglass. The new characteristic of this hybrid material is a combination of each advantage of aluminum, steel and fiberglass. Based on previous studies, the manufacturing of aluminum-fiberglass based material must follow the concept of interlaminar for the better bonding. This work is devoted to the study of the effect of rolled products in aluminum layers of alumina-glass-reinforced plastic. In

particular, the study of static and dynamic properties along and across rolled products was carried out. Aluminum alloys are the most common materials used in the aviation and space industry. These alloys have a relatively high specific strength and a lower density than steels. Consistent optimization of the design of aircraft elements in terms of reducing their weight and the simultaneous fulfillment of specified strength requirements has led to the emergence of metal-polymer composite materials. These materials have a number of advantages over aluminum alloys: lighter weight, higher specific strength, crack resistance. Aluminum fiberglass plastics developed in Russia in the Russian-language literature are called SIAL. Over the past few years, a large number of works have been devoted to the study of materials of this type including in relation to the modeling of large parts of aircraft structural elements. This material consists of alternating layers of aluminum alloys and fiberglass reinforced epoxy. A composite of this type is a promising, improved material with improved specific strength, damage resistance, impact resistance, and fatigue strength. Formed from several layers of aluminum alloy sheet and layers of glass-fiber-reinforced glass-fiber-reinforced-polymer (GFRP), alumino-glass-reinforced plastic behaves like an elastic-plastic material primarily due to the presence of layers of aluminum alloys, and its complex failure mechanisms are determined by its composite structure.

**Keywords:** aluminum fiberglass, static properties, tensile test, dynamic properties, damping coefficient

**Funding:** this work was supported by a grant from the President of the Russian Federation MK-398.2022.4.

**For citation:** Rabinsky L.N., Babaitsev A.V., Shesterkin P.S. Investigation of the influence of rolled products in layers of aluminum-fiberglass on static and dynamic properties. *Trudy MAI*, 2022, no. 124. DOI: [10.34759/trd-2022-124-05](https://doi.org/10.34759/trd-2022-124-05)

## 1. Введение

Алюминиевые сплавы являются наиболее распространенными материалами, применяемыми в авиационной и космической отрасли. Эти сплавы обладают относительно высокой удельной прочностью и более низким значением плотности по сравнению со сталями. Последовательная оптимизация конструкций элементов летательных аппаратов с точки зрения снижения их массы и одновременное выполнение заданных требований по прочности, привела к появлению металлополимерных композиционных материалов. Эти материалы обладают рядом преимуществ по сравнению с алюминиевыми сплавами: меньшая масса, более высокая удельная прочность, стойкостью к образованию трещин.

Слоистые композиционные материалы, структура которых представляет собой повторяющиеся слои листового металла и стеклопластика, это широкий класс металлополимерных композиционных материалов, применяемых в авиационной отрасли [1–6, 8, 9.]. Исследование свойств материалов данного типа было представлено в нескольких русскоязычных работах [15, 16, 19.], но наибольшее их количество являются англоязычными. В зарубежных публикациях материалы данного типа принято называть Fiber Metal Laminates (FML) [7]. В настоящей работе проводится исследование FML, металлическими слоями которого, являются тонкие

листы алюмелевых сплавов. Этот подкласс FML носит название Glass Laminate Aluminum Reinforced Epoxy (GLARE) [8].

Алюмостеклопластики, разрабатываемые в России в русскоязычной литературе носят название СИАЛ. Исследованию материалов данного типа за последние несколько лет посвящено большое количество работ [1, 9, 10, 11, 14, 20] в том числе применительно к моделированию крупногабаритных деталей элементов конструкции летательных аппаратов [12]. Этот материал состоит из чередующихся слоев алюминиевых сплавов и эпоксидной смолы, усиленной стекловолокном. Композит данного типа является перспективным, усовершенствованным материалом с улучшенной удельной прочностью, устойчивостью к повреждениям, ударопрочностью и усталостной прочностью [1–7]. Сформированный из нескольких слоев листового алюминиевого сплава и слоев армированного стекловолокном стеклопластика Glass-Fiber-Reinforced-Polymer (GFRP), алюмостеклопластик ведет себя как упругопластический материал, в первую очередь, из-за наличия слоев алюминиевых сплавов, а его сложные механизмы разрушения определяются его композитной структурой. Исследование динамических свойств под воздействием нагрузки описаны в работе [17, 18].

## **2. Методы исследований**

В данной работе исследуются образцы вдоль и поперек проката на основе алюмостеклопластика, который представляет собой тонкую («листовую») плоскую панель пятислойного композита СИАЛ. Структура материала представляет собой

набор чередующихся слоев алюминиевого сплава и стеклопластика (GFRP) с однонаправленной ориентацией волокон. Центральный слой в структуре выполнен из листа алюминиевого сплава 1441, внешние слои из менее жесткого и прочного листа алюминиевого сплава АВ. В таблице 1 показана послойная структура СИАЛ-3-6Т и толщина каждого слоя.

Таблица 1. Структура материала СИАЛ (общая толщина материала составляет порядка 1,94 мм)

Порядковый номер слоя	Наименование материала слоя	Толщина слоя, мм	Угол ориентации волокон в слое
1	Сплав алюминиевый марки АВ	0,28	-
2.1	Стеклопластик GFRP	0,18	0
2.2	Стеклопластик GFRP	0,18	90
2.3	Стеклопластик GFRP	0,18	0
3	Сплав алюминиевый марки 1441	0,3	-
4.1	Стеклопластик GFRP	0,18	90
4.2	Стеклопластик GFRP	0,18	0
4.3	Стеклопластик GFRP	0,18	90
5	Сплав алюминиевый марки АВ	0,28	-

Из таблицы 1 видно, что структура укладки армирующих волокон внутри слоев стеклопластика относительно центрального слоя алюминиевого сплава марки 1441 (нейтральной плоскости) несимметрично. Такая структура укладки приводит к тому, что в композите в результате механического нагружения или при нагреве, могут

возникать нежелательные, с точки зрения дополнительных напряжений, изгибающие моменты, что необходимо учитывать на стадии проектирования. Несимметричная схема исследуемого композита была выбрана с целью получения квазиизотропной структуры алюмопестклопластика.

Для проверки исследуемых материалов на наличие дефектов и механических свойств, заявленных производителями, а также исключением нежелательных элементов проводился химический анализ. Анализ проводился с использованием детектора X-Max и программное обеспечение Aztec с параметрами: входной сигнал SE, разрешение 1024×640 пикселей (по высоте и ширине соответственно), ширина изображения 2,36 мм, высота изображения 1,47 мм, наклон столика и образца 0 градусов, программа по коррекции наклона не применялась, увеличение 119 х, число усредненных кадров 1, время выдержки 10  $\mu$ s, живое время 29,9 s, время обработки 4, ускоряющее напряжение 9 кВ, рабочее расстояние 31,3 мм, наклон образца 0 градусов, угол отбора 35 градусов, энергетический диапазон 10 кэВ, энергия на канал 10 эВ, тип детектора X-Max. Исследуемые образцы на платформе представлены на рисунке 1.

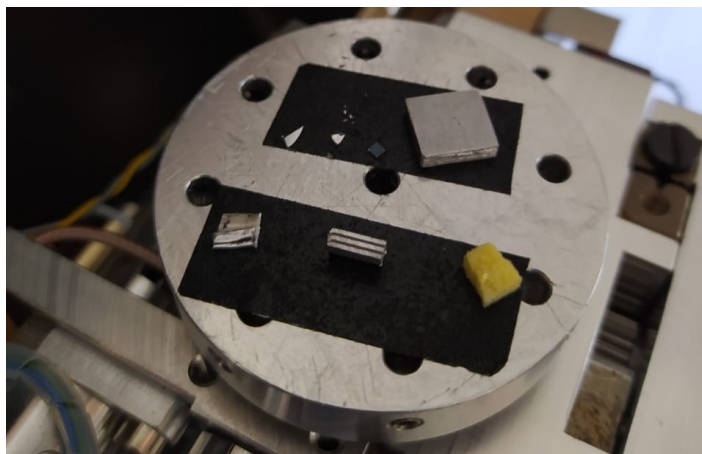


Рис.1. Исследуемые образцы на платформе

Квазистатические испытания проводились на универсальной электромеханической машине Instron 5969. Скорость движения траверсы в испытаниях на растяжение составляла 0,5 мм/мин. Деформации в испытаниях на растяжение измерялись с использованием видеоэкстензометра. Исследуемые образцы вдоль и поперек проката представлены на рисунке 2.

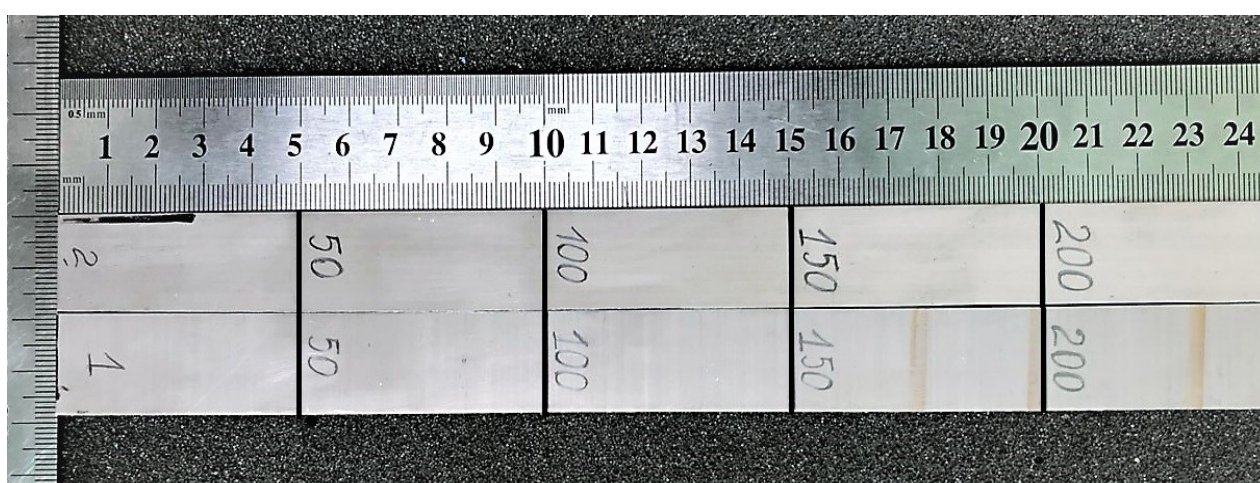


Рис.2. Исследуемые образцы на статические испытания  
(сверху - вдоль проката, снизу – поперек проката)

Динамические испытания проводились на образцах различной длины, рис.3. Образцы жестко закреплялись струбциной с одного конца, а на другом конце задавались условия нагружения, приводящие к возникновению затухающих изгибных колебаний, преимущественно, по первой собственной форме. Для возбуждения колебаний по поверхности образца либо ударяли металлическим ударником, либо задавалось начальное отклонение конца образца от положения



равновесия. Регистрация колебаний проводилась с использованием лазерного датчика Laser Triangulation Sensors RF603HS.

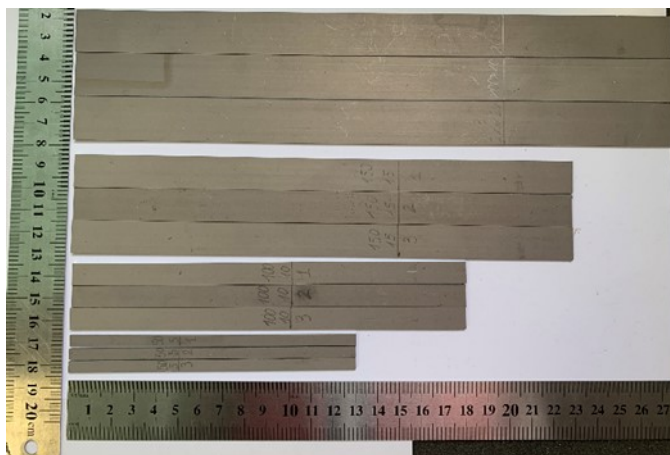


Рис. 3 Исследуемые образцы на динамические испытания

Обработка результатов испытаний проводилась с использованием метода быстрого преобразования Фурье для получения амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) реализующихся колебаний [13]. На получаемых АЧХ определялся пик, соответствующий первой резонансной частоте. Ширина найденного пика позволяет определить коэффициент демпфирования образца  $\zeta$  на основании соотношения (ГОСТ 30630.1.8-2002, ASTM E756):

$$\zeta = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2\omega_0},$$

где  $\omega_0$  – частота резонанса, и  $\omega_1 < \omega_2$  – частоты вблизи резонанса, при которых значение амплитуды уменьшается в  $\sqrt{2}$  раз по сравнению с амплитудой резонанса.

### 3. Результаты

По результатам исследования структуры для образцов СИАЛа проверялись характерные размеры слоев, а также наличие дефектов. По результатам в исследуемом образце дефектов обнаружено не было, а размеры слоев и соответствующий анализ состава представлены на рисунке 4.

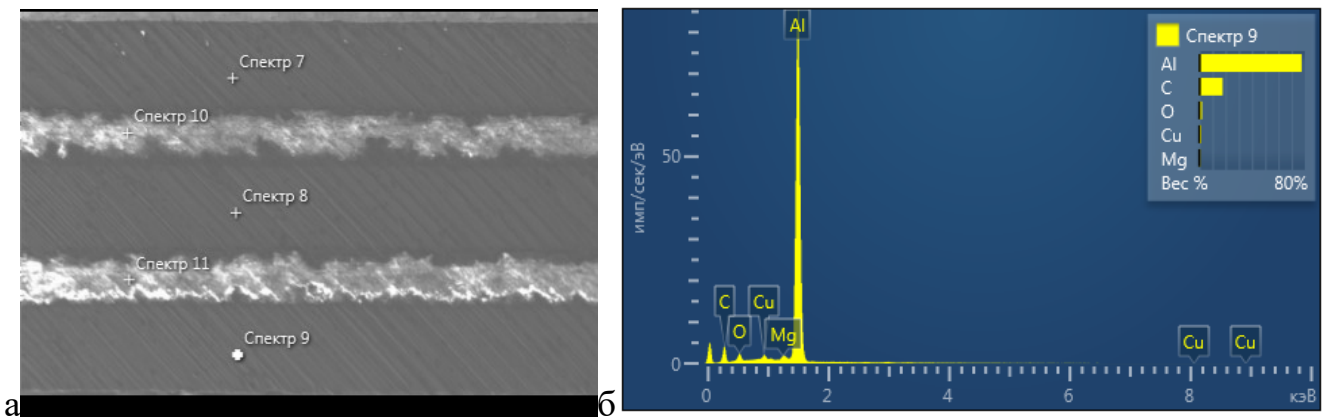


Рис.4 Результаты исследования растровым электронным микроскопом

Пример диаграммы напряжения-деформации, определенной в испытаниях на растяжение для образца алюмостеклопластика представлен на рисунке 5. Эффективный модуль упругости образцов составил  $E^* = 60(\pm 1)$  ГПа. Это значение хорошо согласуется с теоретической оценкой, которая в пренебрежении эффектом Пуассона записывается следующим образом:

$$E_{теор}^* = \frac{3E_{Al}h_{Al} + E_0h_k + E_{90}h_k}{h} = 61 ГПа$$

Расчетное значение наклона диаграммы алюмостеклопластика показано пунктиром на рисунке 5. Предел текучести алюмостеклопластика, связанный с

возникновением пластических деформаций в слоях алюминиевого сплава 1441, составляет не менее 270 МПа, что необходимо учитывать в процессе динамических испытаний, проводимых в зоне упругого поведения материала.

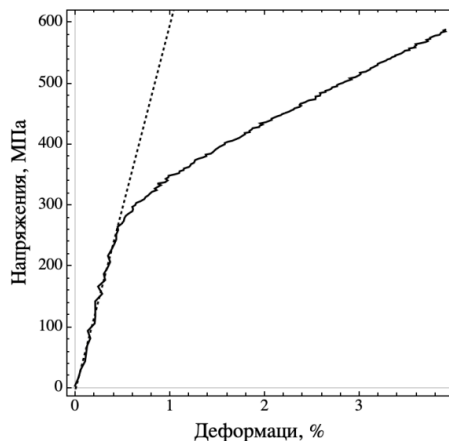


Рисунок 5. Пример диаграммы, определенных в испытаниях на растяжение образцов алюмостеклопластика. Пунктиром показаны результаты, получаемые на основе теоретических оценок.

В таблице 2 приведены результаты экспериментальных данных по определению собственных частот и коэффициентов демпфирования, полученных методом быстрого преобразования Фурье для образцов вдоль и поперек проката. Каждый образец при этом испытывался по 5 раз.

Таблица 2.

	Вдоль проката		Поперек проката		
	Собст. частота	Коэф дем.	Собст. частота	Коэф. дем.	
50	1	66,9856	0,0248542	62,13	0,029141

	2	66,9856	0,0259469	62,2	0,0297618
	3	66,9846	0,0247195	61,4272	0,0293
	4	66,9846	0,0244853	60,9933	0,028761
	5	66,9856	0,0245964	61,9933	0,0317364
100	1	53,4937	0,0207003	51,5126	0,0272
	2	56,0162	0,0207003	51,4427	0,0283665
	3	54,0162	0,0207003	51,3952	0,0288865
	4	52,6248	0,0207003	51,152	0,0297012
	5	52,9192	0,0230231	51,4114	0,0284986
150	1	48,8121	0,0182255	34,9971	0,0271621
	2	48,8121	0,0182255	34,9971	0,0284295
	3	48,8121	0,0182255	34,9971	0,0275064
	4	48,8531	0,0166064	34,9971	0,0271621
	5	48,8373	0,0173041	34,9971	0,0275446
200	1	33,7644	0,0182334	34,0338	0,0171922
	2	33,9327	0,0167424	34,0355	0,0166471
	3	33,8775	0,0179306	34,0214	0,0171922
	4	33,8297	0,0183292	34,0338	0,0166891
	5	33,9086	0,0173891	34,0355	0,0166471

Результаты сравнения полученных динамических характеристик образцов вдоль и поперек проката представлены на рисунке 6.

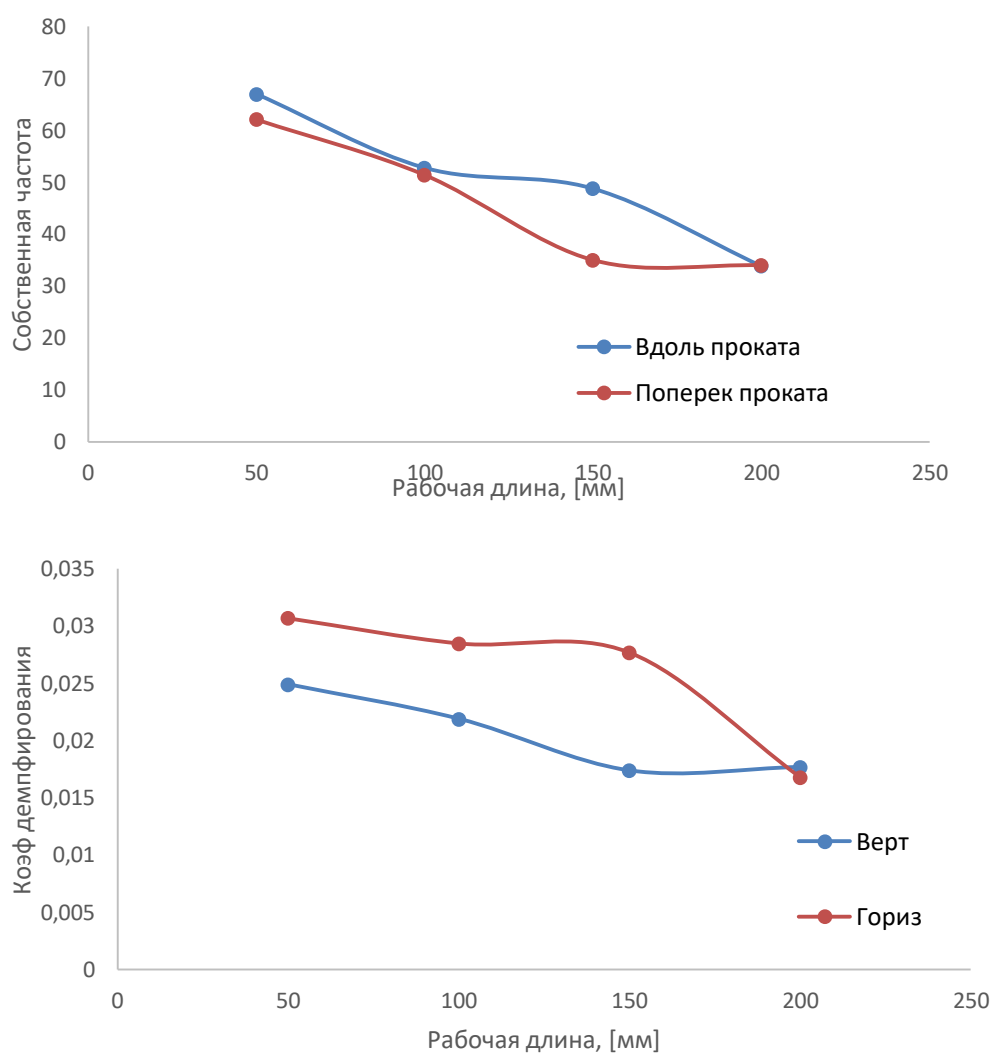


Рис. 6. Результаты сравнения полученных динамических характеристик

### Заключение

Среднепрочный, высокомодульный алюминиево-литиевый сплав марки 1441 пониженной плотности обладает высокой технологической пластичностью, что позволяет холодной рулонной прокаткой получать тонкие листы толщиной до 0,3 мм. Листы из сплава марки 1441 с технологической плакировкой в закаленном и искусственно состаренном состоянии по сравнению с аналогичными листами из

сплава 1163АТ обладают на 30 % улучшенными характеристиками усталостной долговечности и на 25 % пониженными значениями скорости роста усталостной трещины. Листы из сплава марки 1441 с твердой регламентированной плакировкой в закаленном и искусственно состаренном состоянии по сравнению с аналогичными листами из сплава 1163РДТ обладают на 10 % улучшенными характеристиками прочности ( $\sigma_{0,2}$ ) и усталостной долговечности, на 35 % пониженной скоростью роста трещины усталости. Прокатная сталь имеет характерную структуру, в которой зерна, растянутые в направлении прокатки, образуют своеобразное волокно. Механические свойства стали в направлении прокатки существенно отличаются от таковых в направлении, перпендикулярном ей. Образцы, вырезанные таким образом, чтобы их оси совпадали с направлением прокатки, более долговечны, чем образцы, оси которых перпендикулярны направлению прокатки. При холодной прокатке металла вместе с изменением формы зерен происходит изменение ориентировки их пространственной кристаллической решетки в результате направленности скольжения (сдвигов) по определенным плоскостям и направлениям в этих плоскостях; образуется текстура деформации (при обжатиях примерно 50%), что играет важную роль в холодной прокатке тонких листов, где степень деформации достигает больших значений. Тип текстуры определяется главным образом типом кристаллической решетки металла и схемой деформации и почти не зависит от схемы напряженного состояния. Металлы, у которых большинство зерен имеют одинаковую ориентировку, приобретают свойства, близкие к свойствам монокристалла, становятся кристаллически анизотропными.

## Список источников

1. Сенаторова О.Г., Антипов В.В., Лукина Н.Ф. и др. Высокопрочные, трещиностойкие, легкие алюмстеклопластики класса СИАЛ – перспективные материалы для авиационных конструкций // Технология легких сплавов. 2009. № 2. С. 29–31.
2. . Серебренникова Н.Ю., Антипов В.В., Нефедова Ю.Н. Перспективы применения слоистых алюмостеклопластиков на основе алюминий-литиевых сплавов в авиационных конструкциях нового поколения // V Всероссийская научно-техническая конференция «Материалы и технологии нового поколения для перспективных изделий авиационной и космической техники»: сборник трудов. - М.: ВНИИАМ, 2021. С. 43-59.
3. Kotik H., Perez-Ipiña J. Short-beam shear fatigue behavior of fiber metal laminate (GLARE) // International Journal of FatigueInt, 2017, vol. 95, pp. 236-242. DOI:[10.1016/j.ijfatigue.2016.11.001](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.11.001)
4. Jakubczak P., Bienias J., Surowska B. Interlaminar shear strength of fibre metal laminates after thermal cycles // Composite Structures, 2018; vol. 206, pp. 876–87. DOI:[10.1016/J.COMPSTRUCT.2018.09.001](https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2018.09.001)
5. A. Kubit, T. Trzepiecinski, M. K Lonica, M. Hebda, M. Pytel, The influence of temperature gradient thermal shock cycles on the interlaminar shear strength of fibre metal laminate composite determined by the short beam test // Composites Part B: engineering, 2019, vol. 176. DOI:[10.1016/j.compositesb.2019.107217](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107217)

6. Megahed M., Abd El-baky M.A., Alsaedy A.M., Alshorbagy A.E. An experimental investigation on the effect of incorporation of different nanofillers on the mechanical characterization of fiber metal laminate // *Composites. Part B: Engineering*, 2019, vol. 176. DOI:[10.1016/J.COMPOSITESB.2019.107277](https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2019.107277)
7. Sinmazçelik T., Avcu E., Bora M. Ö., Çoban O. A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods // *Materials and Design*, 2011, vol. 32 (7), pp. 3671–3685. DOI:[10.1016/j.matdes.2011.03.011](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.03.011)
8. G. Wu, J.-M. Yang. The mechanical behavior of GLARE laminates for aircraft structures // *Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, 2005, vol. 57 (1), pp. 72–79. DOI:[10.1007/s11837-005-0067-4](https://doi.org/10.1007/s11837-005-0067-4)
9. Vogeslang L.B., Volt A. Development of Fibre Metal Laminates for Advanced Aerospace Materials // *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, vol. 103. DOI:[10.1016/S0924-0136\(00\)00411-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00411-8)
10. Антипов В.В., Добрянский В.Н., Короленко В.А., Лурье С.А., Серебренникова Н.Ю., Соляев Ю.О. Оценка эффективных механических характеристик слоистого алюмопластика в условиях одноосного растяжения // *Вестник Московского авиационного института*. 2018. Т. 25. № 2. С. 221-229.
11. Carlsson L.A., Adams D.F., Pipes R.B. *Experimental characterization of advanced composite materials*, CRC press; 2002, 256 p.
12. Bai S.L., Djafari V., Andr'eani M., Francois D. In situ study of shortbeam shear tests for composite materials // *Composites Science and Technology*, 1995, vol. 55 (4), pp. 343-348. DOI:[10.1016/0266-3538\(95\)00077-1](https://doi.org/10.1016/0266-3538(95)00077-1)



13. Rao S.S. Mechanical Vibrations. Addison-Wesley, 2019, 912 p.
14. Каблов Е.Н., Антипов В.В., Сенаторова О.Г., Лукина Н.Ф. Новый класс слоистых алюмокомпозитов на основе алюминий-литиевого сплава 1441 с пониженной плотностью // Вестник Московского государственного технического университета им. Н. Э. Баумана. Серия: Машиностроение. 2011. S2. С. 174-183.
15. Проскудин О.А., Рабинский Л.Н., Чан К.Т. Определение динамических характеристик металлополимерного слоистого стержня // Труды МАИ. 2021. № 120. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=161419>. DOI: [10.34759/trd-2021-120-06](https://doi.org/10.34759/trd-2021-120-06)
16. Кривень Г.И., Маковский С.В. О демпфирующих свойствах вискеризованного слоя в модифицированных волокнистых композитах // Труды МАИ. 2020. № 114. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=118729>. DOI: [10.34759/trd-2020-114-03](https://doi.org/10.34759/trd-2020-114-03)
17. Антуфьев Б.А., Сукманов И.В. Динамическое поведение тонкостенной конструкции с упругим наполнителем под действием подвижной нагрузки // Труды МАИ. 2021. № 116. URL: <https://trudymai.ru/published.php?ID=121010>. DOI: [10.34759/trd-2021-116-03](https://doi.org/10.34759/trd-2021-116-03)
18. Прокудин О.А., Соляев Ю.О., Бабайцев А.В., Артемьев А.В., Коробков М.А. Динамические характеристики трехслойных балок с несущими слоями из алюмокомпозита // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2020. № 4. С. 260–270. DOI: [10.15593/perm.mech/2020.4.22](https://doi.org/10.15593/perm.mech/2020.4.22)
19. Фридляндер И.Н., Каблова Е.Н. Цветные металлы и сплавы. Композиционные материалы. – М.: Машиностроение, 2001. Т. II-3. - 879 с.

20. Мазаев А.В. Прочностной анализ экспериментальных панелей из композита СИАЛ-3-1 и сплава Д16ч.-ат методом конечных элементов // Авиационные материалы и технологии. 2018. № 1 (50). С. 46-51. DOI: [10.18577/2071-9140-2018-0-1-46-51](https://doi.org/10.18577/2071-9140-2018-0-1-46-51)

## References

1. Senatorova O.G., Antipov V.V., Lukina N.F. et al. *Tekhnologiya legkikh splavov*, 2009, no 2, pp. 29–31.
2. Serebrennikova N.Yu., Antipov V.V., Nefedova Yu.N. *V Vserossiiskaya nauchno-tekhnicheskaya konferentsiya «Materialy i tekhnologii novogo pokoleniya dlya perspektivnykh izdelii aviatsionnoi i kosmicheskoi tekhniki»: sbornik trudov*, Moscow, VNIAM, 2021, pp. 43-59.
3. Kotik H., Perez-Ipiña J. Short-beam shear fatigue behavior of fiber metal laminate (GLARE), *International Journal of FatigueInt*, 2017, vol. 95, pp. 236-242. DOI:[10.1016/j.ijfatigue.2016.11.001](https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2016.11.001)
4. Jakubczak P., Bienias J., Surowska B. Interlaminar shear strength of fibre metal laminates after thermal cycles, *Composite Structures*, 2018; vol. 206, pp. 876–87. DOI:[10.1016/J.COMPSTRUCT.2018.09.001](https://doi.org/10.1016/J.COMPSTRUCT.2018.09.001)
5. A. Kubit, T. Trzepiecinski, M. K Lonica, M. Hebda, M. Pytel, The influence of temperature gradient thermal shock cycles on the interlaminar shear strength of fibre metal laminate composite determined by the short beam test, *Composites Part B: engineering*, 2019, vol. 176. DOI:[10.1016/j.compositesb.2019.107217](https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2019.107217)

6. Megahed M., Abd El-baky M.A., Alsaedy A.M., Alshorbagy A.E. An experimental investigation on the effect of incorporation of different nanofillers on the mechanical characterization of fiber metal laminate, *Composites. Part B: Engineering*, 2019, vol. 176. DOI:[10.1016/J.COMPOSITESB.2019.107277](https://doi.org/10.1016/J.COMPOSITESB.2019.107277)
21. Sinmazçelik T., Avcu E., Bora M. Ö., Çoban O. A review: Fibre metal laminates, background, bonding types and applied test methods // *Materials and Design*, 2011, vol. 32 (7), pp. 3671–3685. DOI:[10.1016/j.matdes.2011.03.011](https://doi.org/10.1016/j.matdes.2011.03.011)
22. G. Wu, J.-M. Yang. The mechanical behavior of GLARE laminates for aircraft structures // *Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, 2005, vol. 57 (1), pp. 72–79. DOI:[10.1007/s11837-005-0067-4](https://doi.org/10.1007/s11837-005-0067-4)
9. Vogeslang L.B., Volt A. Development of Fibre Metal Laminates for Advanced Aerospace Materials, *Journal of Materials Processing Technology*, 2000, vol. 103. DOI:[10.1016/S0924-0136\(00\)00411-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00411-8)
10. Antipov V.V., Dobryanskii V.N., Korolenko V.A., Lur'e S.A., Serebrennikova N.Yu., Solyaev Yu.O. *Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no. 2, pp. 221-229.
11. Carlsson L.A., Adams D.F., Pipes R.B. *Experimental characterization of advanced composite materials*, CRC press; 2002, 256 p.
12. Bai S.L., Djafari V., Andr'eani M., Francois D. In situ study of shortbeam shear tests for composite materials, *Composites Science and Technology*, 1995, vol. 55 (4), pp. 343-348. DOI:[10.1016/0266-3538\(95\)00077-1](https://doi.org/10.1016/0266-3538(95)00077-1)
13. Rao S.S. *Mechanical Vibrations*. Addison-Wesley, 2019, 912 p.
14. Kablov E.N., Antipov V.V., Senatorova O.G., Lukina N.F. *Vestnik Moskovskogo*

*gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. N. E. Baumana. Seriya: Mashinostroenie*, 2011, S2, pp. 174-183.

15. Proskudin O.A., Rabinskii L.N., Chan K.T. *Trudy MAI*, 2021, no. 120. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=161419>. DOI: [10.34759/trd-2021-120-06](https://doi.org/10.34759/trd-2021-120-06)

16. Kriven' G.I., Makovskii S.V. *Trudy MAI*, 2020, no. 114. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=118729>. DOI: [10.34759/trd-2020-114-03](https://doi.org/10.34759/trd-2020-114-03)

17. Antufev B.A., Sukmanov I.V. *Trudy MAI*, 2021, no. 116. URL: <https://trudymai.ru/eng/published.php?ID=121010>. DOI: [10.34759/trd-2021-116-03](https://doi.org/10.34759/trd-2021-116-03)

18. Proskudin O.A., Solyaev Yu.O., Babaitsev A.V., Artem'ev A.V., Korobkov M.A. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*. 2020, no. 4, pp. 260–270. DOI: [10.15593/perm.mech/2020.4.22](https://doi.org/10.15593/perm.mech/2020.4.22)

19. Fridlyander I.N., Kablova E.N. *Tsvetnye metally i splavy. Kompozitsionnye materialy* (Non-ferrous metals and alloys. Composite materials), Moscow, Mashinostroenie, 2001, vol. II-3, 879 p.

20. Mazaev A.V. *Aviatsionnye materialy i tekhnologii*, 2018, no. 1 (50), pp. 46-51. DOI: [10.18577/2071-9140-2018-0-1-46-51](https://doi.org/10.18577/2071-9140-2018-0-1-46-51)

Статья поступила в редакцию 16.02.2022

Статья после доработки 18.02.2022

Одобрена после рецензирования 31.03.2022

Принята к публикации 21.06.2022

The article was submitted on 16.02.2022; approved after reviewing on 31.03.2022; accepted for publication on 21.06.2022