

УДК 669.018.95

А.Н. Жабин¹, Д.В. Сидоров¹, А.Н. Няфкин¹**ВОЛОКНИСТЫЕ КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ
С МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕЙ (обзор)**

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-6-27-35

Представлен обзор научно-технической литературы в области композиционных материалов (КМ) на основе металлических матриц, армированных углеродными волокнами. Кратко описаны основные структурные, физико-механические свойства и морфология таких КМ. Рассмотрены структура и свойства новых КМ из металло-интерметаллидных многослойных ламинатов, армированных углеродными и керамическими волокнами. Применение метода ультразвуковой консолидации для изготовления многослойных волокнистых КМ на основе металло-интерметаллидных ламинатов обеспечивает высокую адгезию волокон с интерметаллидным слоем.

Ключевые слова: композиционный материал, алюминий, титан, углеродные волокна, керамические волокна, металло-интерметаллидный ламинат.

A.N. Zhabin¹, D.V. Sidorov¹, A.N. Nyafkin¹**FIBROUS COMPOSITE MATERIALS WITH A METAL MATRIX (review)**

The article provides an overview of the literature in the field of composite materials (CM) based on metal matrices reinforced with carbon fibers. The main structural, physical and mechanical properties and morphology of such CMS are briefly described. The structure and properties of new CMS from multilayer metal-intermetallic multilayer laminates reinforced with carbon and ceramic fibers are also presented. Application of the method of ultrasonic consolidation for the manufacture of multilayer fibrous CMs based on metal-intermetallic laminates provides high adhesion of fibers with an intermetallic layer.

Keywords: composite material, aluminum, titanium, carbon fibers, ceramic fibers, metal-intermetallic laminate.

¹Федеральное государственное унитарное предприятие «Всероссийский научно-исследовательский институт авиационных материалов» Государственный научный центр Российской Федерации [Federal State Unitary Enterprise «All-Russian Scientific Research Institute of Aviation Materials» State Research Center of the Russian Federation]; e-mail: admin@viam.ru

Введение

При создании высокоэффективных конструкций в различных отраслях промышленности необходимо использовать новые композиционные материалы (КМ) и технологии, включающие оригинальные конструкторско-технологические решения [1–3].

Одними из перспективных конструкционных материалов, обладающих улучшенными характеристиками, являются материалы, получаемые с помощью различных видов армирования, такие как металломатричные КМ, состоящие из металла или сплава в качестве сплошной матрицы и армирующего компонента в виде частиц, а также коротких или непрерывных волокон [4–8]. В металломатричном КМ основные металлические матрицы – это сплавы алюминия, титана, меди, магния. Алюмоматричные КМ широко внедряют в автомобильную, оборонную, транспортную и аэрокосмическую отрасли, а также их применяют в качестве материалов для терморегулирования в электронной промышленности [9]. В таких КМ матрицей может выступать чистый алюминий или

различные сплавы системы Al–Si. По некоторым научно-техническим литературным данным в КМ с алюминиевой матрицей, армированной углеродным волокном, смачивание волокон осуществляется в достаточной степени, что может улучшить механические свойства [9–12].

Конструкции из титана, хотя и отличаются высокими удельными механическими характеристиками, не обладают достаточной жесткостью, особенно при высоких температурах [13]. Для придания жесткости титановым пластинам толщиной 1 мм необходимы высокомодульные волокна, обладающие достаточно хорошей химической совместимостью с титаном, которые пока отсутствуют. В настоящее время единственным наиболее подходящим материалом для создания композитов с титановой матрицей являются высокомодульные углеродные волокна. Селективное армирование пластин из титана небольшой толщины позволяет обеспечивать контроль высокой реакционной способности соединения «титана/углерод» и создавать подходящие методы обработки [13–15].

В конструкциях авиационных деталей также используются ламинированные структуры, состоящие из чередующихся слоев металлических листов и армированных волокнами полимерно-матричных композитов. По сравнению с обычными монолитными металлами они обладают высокой удельной прочностью и жесткостью, отличными характеристиками сопротивления усталости и повышенной огнестойкостью [16].

Армированный стекловолокном алюминиевый ламинат в настоящее время применяется в обшивке самолета А380. Однако модуль упругости и предел рабочих температур ограничивают его разработку, в то время как титановые сплавы обладают более высокой термостойкостью по сравнению с алюминиевыми сплавами, но применение титанового сплава вместо алюминиевого может еще больше повысить удельную прочность и жесткость ламинатов.

В сочетании с высокотемпературной смолой – полиэфирэфиркетонем, ламинаты на основе титана, армированные графито-углеродным волокном, показывают их перспективность для нового поколения сверхзвуковых самолетов и аэрокосмических аппаратов.

Для улучшения механических свойств КМ со слоистой структурой, включая металлический пластичный слой и интерметаллидный слой (Ti–Al₃Ti), вводят различные непрерывные волокна – углеродные (C), карбида кремния (SiC) и оксида алюминия (Al₂O₃). С применением различных технологий обработки получают ряд интерметаллидных металлических слоистых КМ таких систем, как Ti–Al, Ni–Al, Nb–Al и Ti–Cu. Считается, что применение таких многослойных титано-алюминиевых КМ с высокими физико-механическими свойствами потенциально возможно в аэрокосмической промышленности и области броневой защиты. С использованием новой технологии быстрого прототипирования для изготовления трехмерных структур посредством аддитивного производства из металлической фольги применялась ультразвуковая консолидация. Во время процесса ультразвуковой консолидации, вибрация ультразвуковой частоты в сочетании с номинальной силой использовалась для создания статических и осциллирующих поперечных сил между слоями металлической фольги, которые образовывали твердотельное соединение. Более того, ультразвуковую консолидацию использовали для соединения разнородных материалов, таких как Ti–Al, Cu–Al и Fe–Al, при низких температурах (~480 °C). Таким образом, ультразвуковая консолидация может применяться в качестве вспомогательного метода для диспергирования пучков волокон в отдельные волокна в матрице сплава перед формированием КМ [17–19].

Цель данной работы – анализ научно-технических данных в области исследований ламинированных КМ из металлических матриц, армированных непрерывными углеродными и керамическими волокнами, их структуры и свойств.

Композиционные материалы с металлическими матрицами

Для более подробных исследований в области доступных волокон, матричных сплавов, покрытий на поверхности волокон, производственных процессов и их влияния на свойства все чаще уделяют внимание КМ с алюминиевой матрицей, армированной непрерывными углеродными волокнами. Наиболее предпочтительными методами их изготовления являются литье под давлением и порошковая металлургия.

В работе [9] проведены исследования по определению механических характеристик КМ, полученного с помощью метода литья под давлением с использованием матричного алюминиевого сплава АА6061, который армирован углеродным волокном. Исследования показали, что повышение содержания армирующего компонента с 0 до 10 % (объемн.) позволяет увеличить крутящий момент с 24,5 до 52 Н·м, предел прочности при растяжении – с 283 до 315,5 МПа, а также повысить ударную вязкость при содержании 10 % (объемн.) углеродного волокна – до 12,2 Дж [9].

На микроструктуре КМ из алюминиевого сплава марки АА6061 и углеродного волокна видно, что углеродные волокна равномерно распределены в матрице, а также присутствует межфазная адгезия (рис. 1).

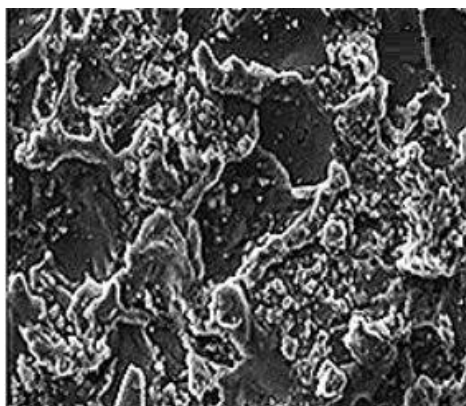


Рис. 1. Микроструктура композиционного материала из алюминиевого сплава АА6061 и углеродного волокна [9]

В аналогичных работах [10–12] авторы подробно описывают физико-механические характеристики материалов с разными матричными сплавами (содержание армирующих углеродных волокон – от 5 до 50 % (объемн.)) и механизмы разрушения композитов после проведенных испытаний. В работах [10, 11] проводились исследования теплофизических и механических свойств КМ, полученных методом порошковой металлургии на основе алюминиевой матрицы, армированной углеродными волокнами. Установлено, что при увеличении объемного содержания углеродного волокна твердость, электропроводность и прочность снижаются: с 71 до 56 НВ, с 30,9 до 14,5 См и с 529 до 214 МПа соответственно, теплопроводность увеличивается до 155 Вт/(м·К) [11], а температурный коэффициент линейного расширения (ТКЛР) снижается – с $36 \cdot 10^{-6}$ до $8 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$ [10].

На рис. 2 представлена микроструктура прессованного КМ с разным объемным содержанием углеродного волокна. Видно, что светлая фаза в структуре – алюминиевая матрица на основе сплава АА7075, а черные точки – углеродные волокна, которые распределены равномерно.

В работе [12] исследованы механические свойства образцов из ламинированного КМ. В результате показано, что пределы прочности при растяжении и изгибе на образцах из КМ увеличиваются с 283 до 316 МПа и с 1790 до 2520 МПа соответственно, а испытания на удар, проводимые для определения энергии удара, показали, что измеренная величина энергии одинакова и равна ~10 Дж.

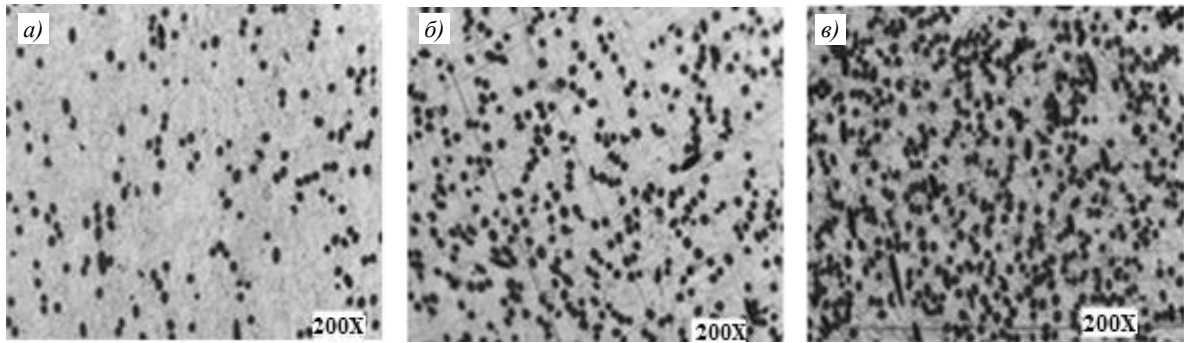


Рис. 2. Микроструктура композиционного материала на основе алюминиевой матрицы сплава марки AA7075 с содержанием углеродных волокон 10 (а), 20 (б) и 30 % (объемн.) (в) [10, 11]

В работах [13, 14] проведены исследования КМ, изготовленного на основе титановой матрицы сплава марки Ti6Al4V с армирующим углеродным волокном марки FT500 методом порошковой металлургии. Показано, что при взаимодействии титана с углеродом диффузия углерода внутрь титана в основном происходит за счет диффузии углерода через карбид титана. В работе [13] описан способ получения титаноматричного КМ путем: приготовления суспензии из смеси порошка титана и растворенного полимера, используемого в качестве связующего; пропитки пучков волокон; сушки преформ для удаления растворителя; удаления полимерного связующего и уплотнения преформ при высокой температуре в сжатом состоянии при горячем прессовании.

На рис. 3 показана микроструктура полученного титаноматричного КМ, армированного углеродным волокном, и образование карбида титана на границе раздела «углеродное волокно–матрица» после горячего прессования. Искусственное введение тонкого (~100 нм) непрерывного слоя на основе карбида титана между слоями титана и углерода, который получен реактивным химическим осаждением из газовой фазы, авторы работы [14] считают наилучшим решением для предотвращения естественного неконтролируемого образования кристаллитов на основе карбида титана (рис. 3, а). На микроструктуре полученного КМ видно довольно хорошее распределение волокон при армировании матрицы (рис. 3, б) [13].

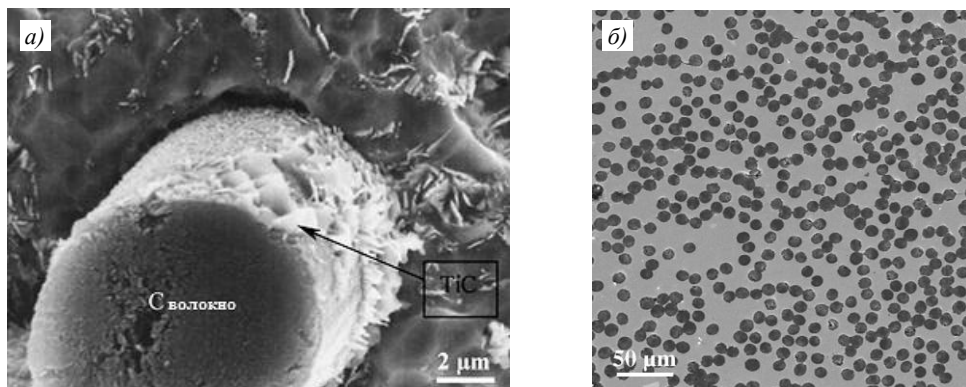


Рис. 3. Микроструктуры образования кристаллитов карбида титана на границе раздела «углеродное волокно–матрица» (а) и титаноматричного композиционного материала, содержащего 35 % (объемн.) углеродного волокна (б) [13, 14]

В работе [14] объяснено взаимодействие между титаном и углеродом, связанное с диффузией углерода в титане, которая приводит к образованию кристаллитов карбида титана на границах зерен титана. В работе [15] также показаны наиболее вероятные превращения в системе Ti–C.

Значения полученных механических характеристик титаноматричного КМ по сравнению со значениями для титановой матрицы имеют незначительные отклонения, которые, по-видимому, связаны с охрупчиванием матрицы и существенной деградацией или дезориентацией волокон. В результате испытаний у такого КМ предел прочности при растяжении составляет 599 МПа, модуль упругости 114 ГПа, предел текучести 384 МПа и деформация при растяжении 22 % при небольшом объемном содержании углеродного волокна (7 %). Можно предположить, что низкие значения прочности связаны с недостаточным объемным содержанием волокна [13].

Волокнистые металлические слоистые композиционные материалы

Зарубежные исследователи уделяют повышенное внимание получению КМ на основе металло-металлических КМ ламинированной структуры. В работе [16] проведено исследование и показаны характеристики слоистого КМ с армирующими углеродными волокнами и без них. Для изготовления КМ из металло-интерметаллидного ламината использован метод горячего прессования и спекания с ультразвуковой консолидацией.

Микроструктура КМ из металло-интерметаллидного ламината системы С–Ti–Al₃Ti представлена из титановых интерметаллидных (Al₃Ti) слоев и углеродных волокон. На рис. 4 видно, что углеродные волокна внедрены в поверхностный слой материала и равномерно распределены в интерметаллидном слое на основе Al₃Ti [16].

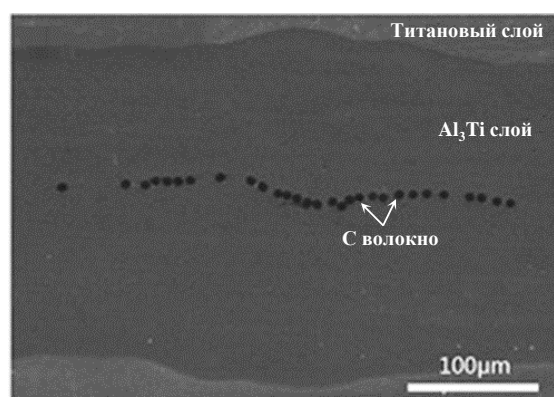


Рис. 4. Микроструктура композиционного материала из металло-интерметаллидного ламината системы С–Ti–Al₃Ti [16]

В таблице приведены сравнительные свойства КМ из металло-интерметаллидных ламинатов систем Ti–Al₃Ti и С–Ti–Al₃Ti [16].

Сравнительные свойства композиционных материалов из металло-интерметаллидных ламинатов систем Ti–Al₃Ti и С–Ti–Al₃Ti [16]

Композиционный материал	Предел прочности при растяжении, МПа	Предел прочности при сжатии, МПа, в направлении приложения нагрузки	
		перпендикулярном	параллельном
Ti–Al ₃ Ti	170	583	878
	174	576	824
	177	586	892
Средние значения	174	582	865
С–Ti–Al ₃ Ti	191	721	878
	192	733	810
	195	726	825
Средние значения	193	727	838

Как видно из данных таблицы, средние значения предела прочности при растяжении КМ из металло-интерметаллидных ламинатов систем Ti–Al₃Ti и C–Ti–Al₃Ti составили 174 и 193 МПа, а средние значения предела прочности при сжатии в перпендикулярном направлении приложения нагрузки составили 582 и 727 МПа соответственно. Прочность при сжатии увеличилась на 145 МПа за счет вводимых углеродных волокон в многослойный композит. Средние значения прочности при сжатии КМ в параллельном направлении приложения нагрузки составили 865 и 838 МПа соответственно, что указывает на изменение линейной упругости, которая приводит к хрупкому разрушению композита [16]. Следует отметить, что многослойный КМ с армирующим углеродным волокном обладает более высокими прочностными характеристиками по сравнению с аналогичными характеристиками многослойного КМ без армирующих углеродных волокон.

На рис. 5 представлена морфология разрушения КМ из металло-интерметаллидных ламинатов систем Ti–Al₃Ti и C–Ti–Al₃Ti после испытаний.

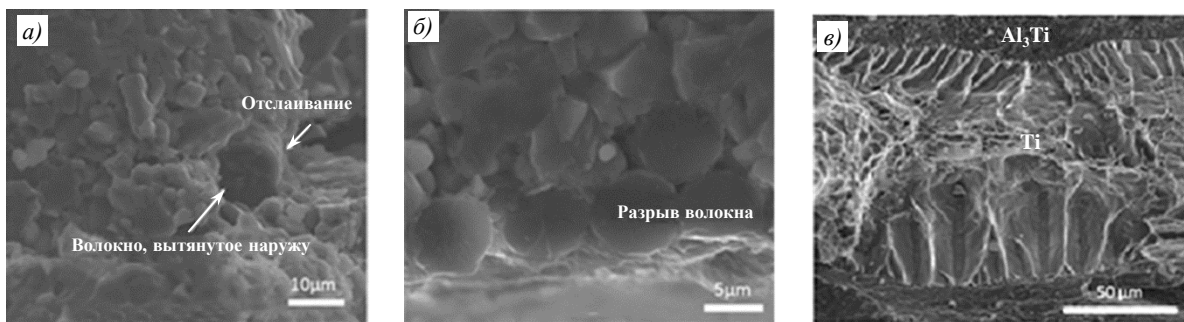


Рис. 5. Микроструктуры излома армированного волокном композиционного материала из вытянутых (а) и разрушенных (б) углеродных волокон и композиционного материала из металло-интерметаллидного ламината системы Ti–Al₃Ti (в) [16]

По морфологии излома КМ из металло-интерметаллидного ламината системы Ti–Al₃Ti видна направленность разрушения, которая формируется за счет плоскости скола и канавки в материале, что является типичным сколом (рис. 5, в). Причина появления разрушения связана с мартенситным превращением, вызванным ультразвуковой консолидацией. Излом слоев Ti и Al₃Ti для КМ из металло-интерметаллидного ламината системы C–Ti–Al₃Ti очень похож на излом КМ из аналогичного ламината системы Ti–Al₃Ti. На рис. 5, а показано явное вытягивание волокон в процессе растяжения. Поверхность вытянутого волокна очень шероховатая, что предполагает хорошее сцепление углеродного волокна с интерметаллидной матрицей на основе Al₃Ti. Однако торцевые поверхности большинства разрушенных углеродных волокон – гладкие и прямые, что можно считать хрупким изломом [16].

В работе [17] проведено исследование механизма межфазного взаимодействия между керамическим волокном Al₂O₃ и интерметаллидом Al₃Ti с целью улучшения механических характеристик КМ из металло-интерметаллидного ламината системы Ti–Al₃Ti, армированного керамическим волокном, с использованием метода спекания в вакууме горячим прессованием и изостатического прессования после горячего прессования.

Микроструктура КМ из металло-интерметаллидного ламината представлена несколькими фазами: Ti, Al₃Ti и Al₂O₃, а также остаточного Al в слое интерметаллида Al₃Ti (рис. 6). Волокна Al₂O₃ распределяются непосредственно в хрупких интерметаллидных слоях, чтобы улучшить механические свойства интерметаллида [17]. Остаточ-

ный Al обнаруживают в интерметаллидном слое Al_3Ti многослойного КМ с армированными волокнами Al_2O_3 до и после горячего изостатического прессования, а количество остаточного Al уменьшается с увеличением температуры и продолжительности взаимодействия. Кроме того, после горячего изостатического прессования волокно Al_2O_3 хорошо связано с интерметаллидом Al_3Ti .

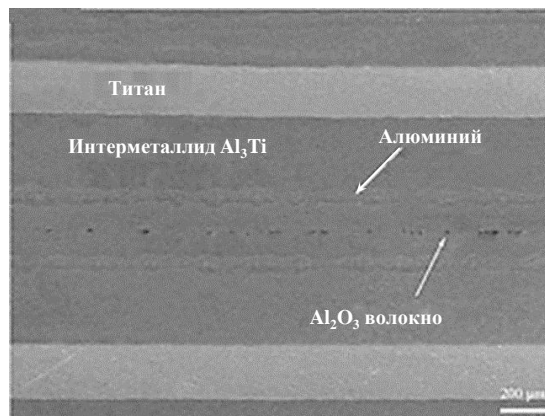


Рис. 6. Микроструктура композиционного материала из металло-интерметаллидного ламината системы $\text{Ti}-\text{Al}_3\text{Ti}$, армированного волокнами Al_2O_3 [17]

По результатам исследований механических свойств КМ из металло-интерметаллидного ламината показано, что пределы прочности при растяжении и сжатии КМ с армированными волокнами Al_2O_3 увеличиваются в 1,5 раза по сравнению с аналогичными характеристиками для металло-интерметаллидного ламината системы $\text{Ti}-\text{Al}_3\text{Ti}$ и в среднем составляют 454 и 328 МПа, 1422 и 1328 МПа соответственно [17].

В работе [18] исследован гибридный ламинат системы «титан–графит», полученный методом горячего прессования с использованием силанового связующего для улучшения характеристик склеивания с полиэфирэфиркетонном в процессе отверждения. В результате исследования получены оптимальные параметры процесса отверждения силанового связующего, а также значения механических свойств – пределов прочности при растяжении, изгибе и межслойном сдвиге, которые составили соответственно 837, 1071 и 75 МПа.

В работе [19] проведены исследования КМ из металло-интерметаллидных керамических ламинатов, армированных керамическими волокнами системы $\text{Ti}-\text{Al}_3\text{Ti}-\text{Al}_2\text{O}_3$, которые получены методом реактивного спекания фольги на воздухе. Изучен механизм вязкого разрушения КМ при испытаниях на изгиб. Предел прочности при изгибе двух разнородных образцов с содержанием алюминия 10 и 32 % (по массе) составил 21 и 23 МПа соответственно. В работе [19] объяснено также образование поверхности излома КМ при изгибе, которое оказывает влияние на границу раздела и объемную долю слоев.

Заключения

Представлены физико-механические свойства КМ, полученных с использованием различных матричных сплавов, в том числе армированных углеродными и керамическими волокнами.

По результатам анализа свойств новых КМ из металло-интерметаллидных многослойных ламинатов, армированных волокнами, установлено, что данные материалы обладают высоким уровнем механических характеристик и превосходят по показателям предела прочности неармированные КМ из металло-интерметаллидного ламината.

Показано, что применение метода ультразвуковой консолидации многослойного волокнистого КМ на основе металло-интерметаллидного ламината, армированного углеродными и керамическими волокнами, обеспечивает высокую адгезию волокон с интерметаллидным слоем, что подтверждается результатами анализа структуры данного материала методом электронной микроскопии.

Большой интерес для применения в авиационной отрасли в качестве конструкционного материала представляют КМ на основе алюминиевых сплавов, армированных углеродными волокнами. Установлено, что физико-механические свойства таких КМ сильно зависят от объемного содержания армирующих углеродных волокон.

Библиографический список

1. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // *Авиационные материалы и технологии*. 2015. № 1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
2. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // *Металлы Евразии*. 2015. № 1. С. 36–39.
3. Каблов Е.Н., Чабина Е.Б., Морозов Г.А., Муравская Н.П. Оценка соответствия новых материалов с использованием СО и МИ высокого уровня // *Компетентность*. 2017. № 2 (143). С. 40–46.
4. Гращенков Д.В. Стратегия развития неметаллических материалов, металлических композиционных материалов и теплозащиты // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № S. С. 264–271. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-S-264-271.
5. Акмеев А.Р., Гуляев И.Н., Ильичев А.В., Иванов Н.В. Исследование механического поведения металлокомпозиата (алюминий–углепластик) с адаптивной схемой армирования // *Авиационные материалы и технологии*. 2017. № 3 (48). С. 43–49. DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-3-43-49.
6. Яковлев А.Л., Ночовная Н.А., Путырский С.В., Крохина В.А. Титанополимерные слоистые материалы // *Авиационные материалы и технологии*. 2016. № S2 (44). С. 56–62. DOI: 10.18577/2071-9140-2016-0-S2-56-62.
7. Арисланов А.А., Гончарова Л.Ю., Ночовная Н.А., Гончаров В.А. Перспективы использования титановых сплавов в слоистых композиционных материалах // *Труды ВИАМ*. 2015. № 10. Ст. 04 URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 26.02.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-10-4-4.
8. Валуева М.И., Зеленина И.В., Хасков М.А., Гуляев А.И. Подготовка углеродного волокна к нанесению интерфазного покрытия для композиционных материалов с керамической матрицей // *Труды ВИАМ*. 2017. № 10 (58). Ст. 09. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 03.03.2021). DOI: 10.18577/2307-6046-2017-0-10-9-9.
9. Mahaviradhan N., Sivaganesan S., Sravya N.P., Parthiban A. Experimental investigation on mechanical properties of carbon fiber reinforced aluminum metal matrix composite // *Materials Today: Proceedings*. 2021. Vol. 39. Part 1. P. 743–747.
10. Deshpande M., Gondil R., Rahul S.V.S. et al. Processing and characterization of carbon fiber reinforced aluminium 7075 // *Materials Today: Proceedings*. 2018. Vol. 5 (2). P. 7115–7122.
11. Deshpande M., Ramesh S.V.S., Gondil R. et al. Studies on 7075 aluminium alloy MMCs with milled carbon fibers as reinforcements // *Transactions of the Indian Institute of Metals*. 2018. Vol. 71 (4). P. 993–1002.
12. Tamilarasan U., Karunamoorthy L., Palanikumar K. Mechanical properties evaluation of the carbon fibre reinforced aluminium sandwich composites // *Materials Research*. 2015. Vol. 18 (5). P. 1029–1037.
13. Even C., Arvieu C., Quenisset J.M. Powder route processing of carbon fibers reinforced titanium matrix composites // *Composites Science and Technology*. 2008. Vol. 68. P. 1273–1281.

14. Arvieu C., Manaud J.P., Quenisset J.M. Interaction between titanium and carbon at moderate temperatures // *Journal of Alloys and Compounds*. 2004. Vol. 68. P. 116–122.
15. Сидоров Д.В., Серпова В.М., Заводов А.В., Шавнев А.А. Исследование межфазного взаимодействия на границе раздела в системе Ti–C с отечественными титановыми сплавами классов $\alpha + \beta$ и псевдо- α // *Физика и химия обработки материалов*. 2020. № 5. С. 75–81. DOI: 10.30791/0015-3214-2020-5-75-81.
16. Jiao F., Liu M., Jiang F. et al. Continuous carbon fiber reinforced Ti/Al₃Ti metal-intermetallic laminate (MIL) composites fabricated using ultrasonic consolidation assisted hot pressing sintering // *Materials Science & Engineering A*. 2019. Vol. 765. P. 1–21.
17. Han Y., Lin C., Han X. et al. Fabrication, interfacial characterization and mechanical properties of continuous Al₂O₃ ceramic fiber reinforced Ti/Al₃Ti metal-intermetallic laminated (CCFR-MIL) composite // *Materials Science & Engineering A*. 2017. Vol. 688. P. 338–345.
18. Ji C., Wang B., Hu J. et al. Effect of different preparation methods on mechanical behaviors of carbon fiber-reinforced PEEK-Titanium hybrid laminates // *Polymer Testing*. 2020. Vol. 85. P. 1–10. DOI: 10.1016/j.polimertesting.2020.106462.
19. Vecchio K.S., Jiang F. Fracture toughness of Ceramic-Fiber-Reinforced Metallic-Intermetallic-Laminate (CFR-MIL) composites // *Materials Science & Engineering A*. 2016. Vol. 649. P. 407–416.