

УДК 620.172

Д.И. Певчев¹, М.А. Горбовец¹, П.В. Рыжков¹, Е.И. Курбаткина¹

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПРОЧНОСТИ ДИСПЕРСНОУПРОЧНЕННОГО МЕТАЛЛИЧЕСКОГО КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА МАРКИ ВКМ22

DOI: 10.18577/2307-6046-2021-0-2-30-38

Во многих отраслях промышленности, таких как машиностроение и авиационно-космическая отрасль, на смену традиционным сплавам пришли металлические композиционные материалы (МКМ), которые, по сравнению с неармированными сплавами, характеризуются повышенной прочностью и жесткостью в сочетании с низкой плотностью. Для расчета ресурса узлов для безопасной и надежной эксплуатации новой техники необходимо иметь набор расчетных значений характеристик конструкционной прочности МКМ, в том числе характеристик кратковременной и длительной прочности, мало- (МЦУ) и многоцикло-вой усталости (МнЦУ). Работа посвящена исследованию характеристик кратковременной и длительной прочности, МЦУ и МнЦУ дисперсноупрочненного МКМ марки ВКМ22.

Ключевые слова: композиционный материал, алюминиевый сплав, карбид кремния, упрочняющие частицы, характеристики прочности.

D.I. Pevchev¹, M.A. Gorbovets¹, P.V. Ryzhkov¹, E.I. Kurbatkind¹

INVESTIGATION OF THE STRENGTH CHARACTERISTICS DISPERSION-STRENGTHENED METAL-CERAMIC COMPOSITE MATERIAL VKM22

In many industries, such as mechanical engineering and aerospace, traditional alloys are being replaced by metal matrix composites (MCM). Compared to unreinforced alloys, MCM is characterized by increased strength and rigidity combined with low density. To calculate the resource of nodes for the safe and reliable operation of new equipment, it is necessary to have a set of calculated values of the MCM strength characteristics, including the characteristics of short-term and long-term strength, low-cycle (LCF) and high-cycle (HCF) fatigue. The work is devoted to the study of the characteristics of short-term and long-term strength, LCF and MCF fatigue of dispersion-strengthened MKM grade VKM22.

Keywords: composite material, aluminum alloy, silicon carbide, hardening particles, strength characteristics.

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

Повышение эксплуатационных требований к узлам и деталям авиационной техники приводит к необходимости разработки новых материалов. Одним из перспективных классов материалов для решения поставленных задач являются дисперсноупрочненные металлические композиционные материалы (МКМ). В настоящее время зарубежными и отечественными материаловедческими организациями ведутся исследования и разработки по созданию и применению такого класса материалов, которые,

по сравнению с неармированными сплавами, характеризуются повышенными прочностью и жесткостью в сочетании с низкой плотностью [1–4]. По структуре МКМ подразделяются на несколько групп: волокнистые, слоистые и дисперсноупрочненные. У волокнистых МКМ волокна располагаются направленно с заданным шагом или хаотично, расстояние между волокнами определяется объемной долей армирующей фазы. У слоистых материалов слои металла чередуются со слоями интерметаллида или керамики, а у дисперсноупрочненных – дисперсные частицы равномерно распределяются в объеме всей матрицы [5].

В дисперсноупрочненных МКМ матрица является несущим элементом структуры, в которой с помощью дисперсных частиц и однородной дислокационной структуры создается эффективное торможение дислокаций. Кроме того, свойства таких материалов могут проектироваться заранее – под определенные задачи [6, 7]. В такие материалы искусственно вводят мельчайшие равномерно распределенные тугоплавкие частицы, не взаимодействующие с матрицей и не растворяющиеся в ней вплоть до температуры плавления фаз. Чем мельче частицы наполнителя и меньше расстояния между ними, тем прочнее МКМ. Частицы тугоплавких соединений увеличивают твердость материала, а пластичная металлическая матрица придает ему вязкость и пластичность [8].

С повышением температуры механические свойства МКМ снижаются значительно слабее, по сравнению с неармированными сплавами [9, 10]. Одной из особенностей дисперсноармированного МКМ является его изотропность. Изотропные МКМ обладают одинаковыми свойствами во всех направлениях.

Из МКМ с алюминиевой матрицей и упрочняющими частицами карбида кремния (SiC) изготавливают элементы обшивки самолета, поршни и тормозные диски.

Компания DWA Aluminium Composites USA, Inc. производит подфюзеляжный киль для истребителя F-16 из данного материала, заменив им алюминиевый сплав. Замена материала позволила увеличить срок эксплуатации конструкции в 4 раза при снижении эксплуатационных расходов на 30%. Для уменьшения массы статорных лопаток направляющего аппарата вентилятора на 30% в двигателях, изготовленных фирмой Pratt & Whitney для Boeing 777, вместо титановых сплавов используют МКМ системы Al-SiC [11, 12].

Конструкции авиационной техники в процессе эксплуатации подвергаются большому спектру статических и циклических нагрузок в широком диапазоне температур и долговечностей. Поэтому для расчета ресурса узлов для безопасной и надежной эксплуатации новой техники необходимо иметь набор расчетных значений характеристик конструкционной прочности, в том числе характеристик кратковременной и длительной прочности, мало- (МЦУ) и многоциклового усталости (МнЦУ). Проведение комплексных испытаний при статическом и циклическом нагружении является неотъемлемой частью процесса разработки технологии получения МКМ данного класса.

Исследуемый дисперсноупрочненный МКМ марки ВКМ22 планируется к применению в деталях вертолетных двигателей, работоспособных до температуры 120 °С.

Работа выполнена в рамках реализации научного направления 2. «Квалификация и исследование материалов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [13].

Материалы и методы

Для получения МКМ марки ВКМ22 использовали методы порошковой металлургии с последующим прессованием и горячей экструзией.

Технология изготовления МКМ включает: приготовление исходной шихты для механического легирования, механическое легирование исходных компонентов

в планетарной шаровой мельнице, предварительное компактирование материала на гидравлическом прессе и горячую экструзию консолидированных заготовок.

В качестве исходного компонента применяли металлопорошковую композицию алюминиевого сплава В95 системы Al–Zn–Mg–Cu в термообработанном состоянии по режиму T1 (закалка с нагревом до 470 °С, охлаждение в воде, затем следует процесс старения при температуре 140 °С и выдержке 15 ч), полученную методом газодинамического распыления на установке Hermiga 10/100 VI, и армирующий порошок карбида кремния марки 64С фракции F1200. Частицы порошка из алюминиевого сплава В95 имеют сферическую форму, а их размер составляет от 5 до ~70 мкм. Частицы порошка карбида кремния однородны по размеру, имеют осколочную структуру, характерную для керамических материалов, а их размер составляет от 7 до ~10 мкм. Объемная доля алюминиевого сплава В95: 77,5%, а порошка карбида кремния марки 64С: 22,5%. Для получения композиционных гранул применяли механическое легирование, представляющее собой длительное смешивание исходных компонентов в высокоэнергетической планетарной шаровой мельнице, целью которого является формирование заданной структуры и химического состава в композиционных гранулах. Частицы армирующего компонента благодаря своим форме и размерам легко внедряются внутрь пластичного материала матрицы. Полученные композиционные гранулы приобретают сферическую форму размером от 400 до 600 мкм, а структура – однородный характер. Применение метода порошковой металлургии позволяет получить МКМ с равномерным распределением частиц армирующей фазы по всему объему матричного сплава, исключая образование вторичной фазы на границе «матрица–упрочнитель» [14, 15].

Микроструктура дисперсноупрочненного МКМ марки ВКМ22 после прессования и горячей экструзии представлена на рис. 1. Основу составляет алюминиевый сплав с распределенной в нем армирующей составляющей из SiC. Упрочняющая фаза на основе частиц карбида кремния равномерно распределена по всему объему.

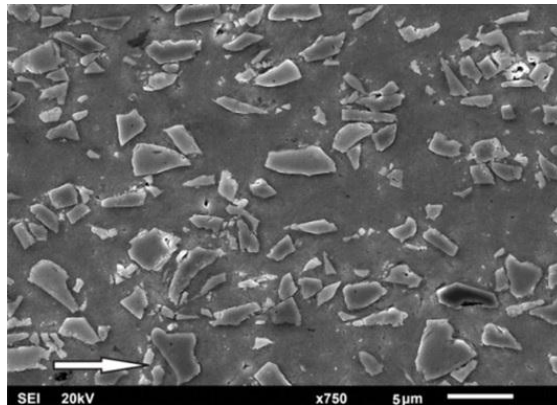


Рис. 1. Микроструктура дисперсноупрочненного металлического композиционного материала марки ВКМ22

Из прессованных и термообработанных прутков диаметром 18 мм из МКМ марки ВКМ22 вырезаны заготовки в продольном направлении, из которых затем изготовлены образцы для испытаний на растяжение, длительную прочность, МЦУ и МнЦУ.

Испытания на растяжение и длительную прочность проводили на гладких цилиндрических образцах диаметром 5 мм и длиной рабочей части 25 мм на испытательных машинах Карра 50 DS и Карра 50 LA [16] по методике, соответствующей ГОСТ 1497–84 и ГОСТ 9651–84 (для испытаний на растяжение), а также ГОСТ 10145–81 (для испытаний на длительную прочность).

Испытания на МЦУ осуществляли на корсетных образцах диаметром 5 мм и длиной рабочей части 32,5 мм на сервогидравлической испытательной машине фирмы Walter+Bai AG (Швейцария) с частотой 1 Гц при комнатной и повышенной температурах.

Испытания на МнЦУ проводили на корсетных образцах диаметром 5 мм и длиной рабочей части 32,5 мм на сервогидравлической испытательной машине Walter+Bai AG с частотой 50 Гц при комнатной температуре и на магнитно-резонансной испытательной машине RUMUL Testronic с частотой 140 Гц при повышенной температуре.

Все испытания на МЦУ и МнЦУ выполняли при симметричном цикле нагружения ($R=-1$) синусоидальной формы. Контролируемым параметром являлась нагрузка [17]. Методика проведения испытаний соответствовала ГОСТ 25.502–79.

Результаты и обсуждение

Проведены испытания на растяжение МКМ марки ВКМ22 при температурах 20, 70, 120 и 170 °С. На каждом температурном уровне испытывали по 5 образцов.

В табл. 1 представлены средние значения модуля упругости E , предела текучести $\sigma_{0,2}$, предела прочности σ_b и относительного удлинения δ МКМ марки ВКМ22, а также сплава В95-Т1. Все характеристики получены на образцах, вырезанных продольно.

Таблица 1

Средние значения модуля упругости, предела текучести, предела прочности и относительного удлинения металлического композиционного материала марки ВКМ22 и сплава В95-Т1 при различных температурах

Сплав	Вид полуфабриката	Температура испытания, °С	E , ГПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_b , МПа	δ , %
ВКМ22	Пруток диаметром 18 мм	20	109	640	650	0,45
		70	110	650	660	0,95
		120	98	605	620	1,85
		170	98	550	570	5,3
В95-Т1*	Пруток диаметром от 5 до 22 мм	20	–	390	490	6
	Прессованные полуфабрикаты	125	–	480	520	6

* Данные по сплаву В95-Т1 взяты из справочника [18].

Как видно из данных, представленных в табл. 1, максимальное значение прочностных характеристик МКМ марки ВКМ22 достигается при температуре 70 °С. При повышении температуры >120 °С характеристики прочности снижаются. Показатель пластичности с повышением температуры монотонно увеличивается.

Композиционный материал марки ВКМ22 превосходит алюминиевый сплав В95-Т1 по следующим характеристикам: при температуре 20 °С значения предела прочности выше на 33%, а предела текучести – на 64%. Это достигается за счет того, что частицы карбида кремния создают дислокационную структуру, которая служит барьером и способствует торможению дислокаций [19].

Испытания МКМ марки ВКМ22 и сплава В95-Т1 проведены при рабочих температурах на разных полуфабрикатах. Температура испытаний отличалась на 5 °С, поэтому превосходство МКМ по характеристикам прочности будет косвенное: при температурах 120–125 °С значения предела прочности выше на 19%, предела текучести – на 26%.

Проведены испытания на длительную прочность МКМ марки ВКМ22 при температурах 100 и 120 °С с долговечностями до 500 ч. На каждом температурном уровне испытывали по 12 образцов – по 4 образца на каждую базу испытаний.

Полученные результаты испытаний на длительную прочность подвергали статистической обработке с использованием уравнения температурно-силовой зависимости времени до разрушения τ_p [20]:

$$\tau_p = \xi T^m \sigma^{-n} \exp\left(\frac{U_0 - \eta\sigma}{RT}\right),$$

где T – температура, К; σ – напряжение, МПа; ξ, m, n, U_0, η – коэффициенты, определяемые по результатам испытаний на длительную прочность; R – универсальная газовая постоянная.

Расчет по данному уравнению позволил определить пределы длительной прочности МКМ марки ВКМ22 при температурах 100 и 120 °С (табл. 2), а также построить кривые длительной прочности (рис. 2).

Таблица 2

Значения пределов длительной прочности металлического композиционного материала марки ВКМ22 при различных температурах и долговечностях

Сплав	Вид полуфабриката	Температура испытания, °С	Предел длительной прочности, МПа, при долговечности, ч		
			10	100	500
ВКМ22	Пруток диаметром 18 мм	100	365	295	250
		120	290	235	200
В95-Т1*	Листы и плиты	100	–	390	–

* Данные по сплаву В95-Т1 взяты из справочника [18].

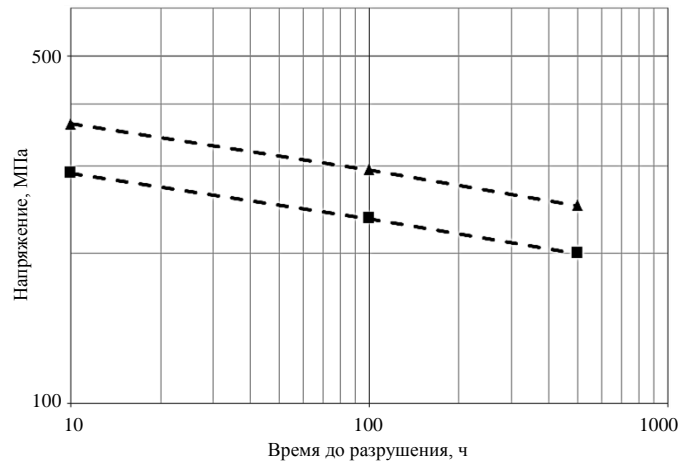


Рис. 2. Кривые длительной прочности металлического композиционного материала марки ВКМ22 при температурах 100 (▲) и 120 °С (■)

По результатам испытаний на длительную прочность установлено, что при температурах 100 и 120 °С с увеличением долговечностей от 10 до 500 ч пределы длительной прочности уменьшаются.

Значения пределов длительной прочности сплава В95-Т1, полученные при температуре 100 °С на полуфабрикатах «лист» и «плита», превышают значения аналогичных пределов МКМ марки ВКМ22, полученных на полуфабрикате «пруток», на 32%. Это обусловлено тем, что испытания проведены на разных полуфабрикатах, при этом матрица и армирующие частицы МКМ имеют различный температурный коэффициент линейного расширения, что может приводить к внутренним напряжениям [21].

Проведены испытания МКМ марки ВКМ22 на МЦУ при температурах 20 и 100 °С. Для определения предела выносливости, соответствующего вероятности неразрушения 50%, испытано 15 образцов при температуре 20 °С и 21 образец – при

температуре 100 °С на базе 10^4 циклов. Полученные значения пределов выносливости и результаты регрессионного анализа представлены в табл. 3.

Таблица 3

**Значения пределов выносливости МЦУ и результаты регрессионного анализа
металлического композиционного материала марки ВКМ22
и сплава 7075 при различных температурах**

Сплав	Вид полуфабриката	Температура испытания, °С	Коэффициенты линии регрессии		Предел выносливости, МПа, на базе 10^4 циклов
			<i>a</i>	<i>b</i>	
ВКМ22	Пруток диаметром 18 мм	20	53,71	-18,56	470
		100	25,67	-8,39	360
7075*	Пруток диаметром 54 мм	20	–	–	280

* Данные по сплаву 7075 взяты из работы [22].

Уравнение кривой усталости представлено степенным уравнением $\sigma^m N = \text{const}$, которое после логарифмирования принимает форму $\lg N = a + b \lg \sigma$ и представляется прямой линией в системе двойных логарифмических координат. В данном случае логарифм напряжения $\lg \sigma$ является независимой переменной, а логарифм количества циклов до разрушения $\lg N$ – случайной величиной.

У образцов, испытанных при комнатной температуре, коэффициент *b* уравнения регрессии имеет в ~2 раза меньшее значение, по сравнению с коэффициентом, наблюдаемым у образцов, испытанных при повышенной температуре. Сопоставление коэффициентов показывает, что при равном уменьшении амплитуды напряжений гораздо интенсивнее происходит увеличение долговечности у образцов, испытанных при комнатной температуре (рис. 3). Долговечность при всех значениях симметричного цикла «растяжение–сжатие» соответствует области малоциклового усталостного нагружения, и разрушение происходит в упругой области деформирования. При температурах 20 и 100 °С в области долговечности с пределом выносливости на базе $5 \cdot 10^3$ циклов верхний уровень амплитуды напряжений составляет 0,77 от предела текучести. При долговечности с пределом выносливости на базе 10^4 циклов амплитуда напряжений составляет 0,75 от предела текучести при температуре 20 °С и 0,63 – при температуре 100 °С. Значение предела выносливости при температуре 100 °С, по сравнению с его значением при температуре 20 °С, на базе испытаний 10^4 циклов снизилось на 23%.

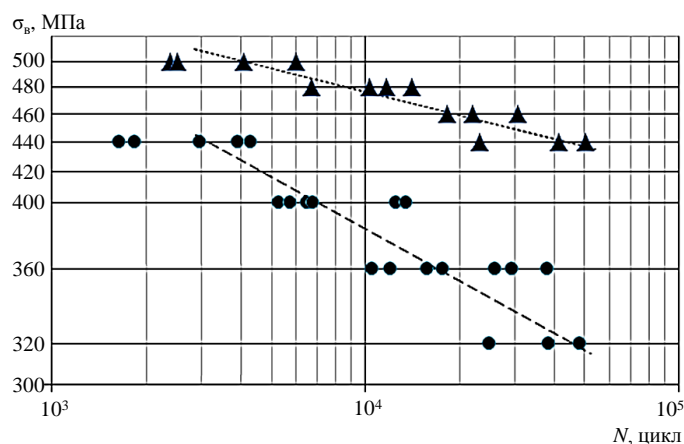


Рис. 3. Экспериментальные результаты испытаний на малоцикловую усталость образцов из металлического композиционного материала марки ВКМ22 при температурах 20 (▲) и 100 °С (●)

Значение предела выносливости МКМ марки ВКМ22, полученное на базе 10^4 циклов при температуре 20 °С, превышает значение аналогичного предела сплава 7075 на 68%.

Проведены испытания МКМ марки ВКМ22 на МнЦУ при температурах 20 и 100 °С. Для определения предела выносливости, соответствующего вероятности разрушения 50% при каждой температуре, испытано 15 образцов на базе $2 \cdot 10^7$ циклов. Полученные значения пределов выносливости и результаты регрессионного анализа представлены в табл. 4.

Таблица 4

Значения пределов выносливости МнЦУ и результаты регрессионного анализа металлического композиционного материала марки ВКМ22 и сплава В95-Т1 при различных температурах

Сплав	Вид полуфабриката	Температура испытания, °С	Коэффициенты линии регрессии		Предел выносливости, МПа, на базе $2 \cdot 10^7$ циклов
			<i>a</i>	<i>b</i>	
ВКМ22	Пруток диаметром 18 мм	20	42,6	14,67	240
		100	37,25	12,76	220
В95-Т1*	Плита толщиной 60 мм	20	–		170

* Данные по сплаву В95-Т1 взяты из работы [23].

На рис. 4 приведены линии регрессии, построенные по экспериментальным данным разрушенных образцов, соответствующие медианной кривой. При построении использовали метод наименьших квадратов.

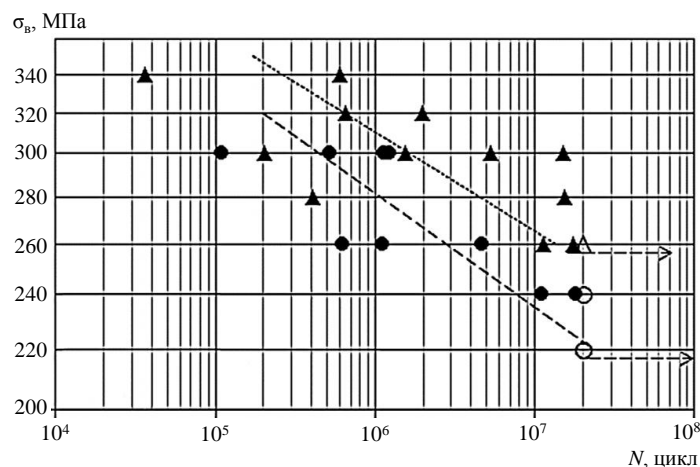


Рис. 4. Экспериментальные результаты испытаний на многоцикловую усталость разрушенных (▲, ●) и неразрушенных (△, ○) образцов из металлического композиционного материала марки ВКМ22 при температурах 20 (▲, △) и 100 °С (●, ○)

Как видно из данных, представленных в табл. 4, образцы, испытанные при температуре 20 °С, характеризуются более высоким пределом выносливости, чем образцы, испытанные при температуре 100 °С: превышение составляет 9% на базе $2 \cdot 10^7$ циклов. У образцов, испытанных при комнатной температуре, наблюдается несколько больший угол наклона линии регрессии к оси циклов, по сравнению с образцами, испытанными при температуре 100 °С. Коэффициент *b* уравнения регрессии имеет большее значение, по сравнению с коэффициентом у образцов, испытанных при повышенной температуре.

Значение предела выносливости МКМ марки ВКМ22, полученное на базе $2 \cdot 10^7$ циклов при температуре 20 °С на полуфабрикате «пруток», превышает значение аналогичного предела сплава В95-Т1, полученного на полуфабрикате «плита», на 41%.

Заключения

В результате проведенных исследований дисперсноупрочненного МКМ марки ВКМ22 определены значения характеристик кратковременной и длительной прочности, а также МЦУ и МнЦУ при комнатной и повышенных температурах.

Максимальное значение прочностных характеристик при растяжении достигается при температуре 70 °С; при температуре >120 °С характеристики прочности снижаются.

При повышении температуры испытаний с 20 до 100 °С предел выносливости МЦУ снижается на 23% при базе испытаний 10^4 циклов, а предел выносливости МнЦУ – на 8% при базе испытания $2 \cdot 10^7$ циклов.

Установлено, что введение армирующей фазы частиц карбида кремния с содержанием 22,5% (объемн.) в алюминиевый сплав В95-Т1 позволило повысить следующие механические характеристики при испытаниях на растяжение и МЦУ при комнатной температуре на базе 10^4 циклов: предел прочности – на 33%, предел текучести – на 64%, предел выносливости – на 68%.

Библиографический список

1. История авиационного материаловедения. ВИАМ – 80 лет: годы и люди / под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ, 2012. 519 с.
2. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России // Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.
3. Каблов Е.Н. Материалы нового поколения – основа инноваций, технологического лидерства и национальной безопасности России // Интеллект и технологии. 2016. №2 (14). С. 16–21.
4. Каблов Е.Н. Композиты: сегодня и завтра // Металлы Евразии. 2015. №1. С. 36–39.
5. Краснов Е.И., Штейнберг А.С., Шавнев А.А., Серпова В.М., Жабин А.Н. Исследование слоистого металлического композиционного материала системы Ti–TiAl₃ // Труды ВИАМ. 2016. №7 (43). Ст. 03. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 15.09.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-7-3-3.
6. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 7–17.
7. Тарасов Ю.М., Антипов В.В. Новые материалы ВИАМ – для перспективной авиационной техники производства ОАО «ОАК» // Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 5–6.
8. Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Ивахненко Ю.А., Балинова Ю.А. Перспективные армирующие высокотемпературные волокна для металлических и керамических композиционных материалов // Труды ВИАМ. 2013. №2. Ст. 05. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 21.09.2019).
9. Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Гращенко Д.В., Шавнев А.А., Няфкин А.Н. Металломатричные композиционные материалы на основе Al–SiC // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 373–380.
10. Шмотин Ю.Н., Старков Р.Ю., Данилов Д.В., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Новые материалы для перспективного двигателя ОАО «НПО „Сатурн”» // Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 6–8.
11. Березовский В.В., Шавнев А.А., Ломов С.Б., Курганова Ю.А. Получение и анализ структуры дисперсноупрочненных композиционных материалов системы Al–SiC с различным содержанием армирующей фазы // Авиационные материалы и технологии. 2014. №S6. С. 17–23. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s6-17-23.

12. 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.
13. 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.
14. Каблов Е.Н., Гращенков Д.В., Щетанов Б.В., Шавнев А.А., Няфкин А.Н. и др. Металлические композиционные материалы на основе Al–SiC для силовой электроники // *Механика композиционных материалов и конструкций*. 2012. Т. 18. №3. С. 359–368.
15. Каблов Е.Н., Чибиркин В.В., Вдовин С.М. Изготовление, свойства и применение теплоотводящих оснований из ММК Al–SiC в силовой электронике и преобразовательной технике // *Авиационные материалы и технологии*. 2012. №2. С. 20–22.
16. Соловьев А.Е., Голынец С.А., Хвацкий К.К., Асланян И.Р. Проведение статических испытаний при растяжении на машинах фирмы Zwick/Roell // *Труды ВИАМ*. 2015. №8. Ст. 12. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.10.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-12-12.
17. Горбовец М.А., Ходинев И.А., Рыжков П.В. Оборудование для проведения испытаний на малоцикловую усталость при «жестком» цикле нагружения // *Труды ВИАМ*. 2018. №9 (69). Ст. 06. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 05.10.2020). DOI: 10.18577/2307-6046-2018-0-9-51-60.
18. Белецкий В.М., Кривов Г.А. Алюминиевые сплавы (состав, свойства, технологии, применение): справочник / под общ. ред. И.Н. Фридляндера. Киев: КОМИНТЕХ, 2005. 365 с.
19. Tham L.M., Gupta M., Cheng L. Effect of limited matrix-reinforcement interfacial reactions on enhancing the mechanical properties of aluminum-silicon carbide compo-sites // *Acta Materialia*. 2001. Vol. 49. No. 16. P. 3243–3253.
20. Каблов Е.Н., Голубовский Е.Р. Жаропрочность никелевых сплавов. М.: Машиностроение, 1998. 463 с.
21. Гришина О.И., Шавнев А.А., Серпова В.М. Особенности влияния структурных параметров на механические характеристики металлического композиционного материала на основе алюминиевых сплавов, упрочненных частицами карбида кремния // *Авиационные материалы и технологии*. 2014. №S6. С. 24–27. DOI: 10.18577/2071-9140-2014-0-s6-24-27.
22. Pandey V., Chattopadhyay K., Srinivas N.C., Singh V. Role of Ultrasonic Shot Peening on Low Cycle Fatigue Behavior of 7075 Aluminium Alloy // *International Journal of Fatigue*. 2017. DOI: 10.1016/j.ijfatigue.2017.06.033.
23. Радецкая Э.М., Макеев Ю.И. Коррозионная усталость высокопрочных алюминиевых сплавов // *Авиационные материалы*. М.: ВИАМ, 1987. Вып.: Повышение прочности и надежности конструкционных материалов. С. 204–214.