



УДК 669.018.95

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-10-5-5

**АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОПРОЧНЫХ
И ВЫСОКОМОДУЛЬНЫХ ВОЛОКНИСТЫХ
МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ
АВИАЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ (обзор)**

О.И. Гришина

В.Н. Кочетов

А.А. Шавнев

кандидат технических наук

В.М. Серпова

Октябрь 2014

Всероссийский институт авиационных материалов (ФГУП «ВИАМ» ГНЦ) – крупнейшее российское государственное материаловедческое предприятие, на протяжении 80 лет разрабатывающее и производящее материалы, определяющие облик современной авиационно-космической техники. 1700 сотрудников ВИАМ трудятся в более чем тридцати научно-исследовательских лабораториях, отделах, производственных цехах и испытательном центре, а также в четырех филиалах института. ВИАМ выполняет заказы на разработку и поставку металлических и неметаллических материалов, покрытий, технологических процессов и оборудования, методов защиты от коррозии, а также средств контроля исходных продуктов, полуфабрикатов и изделий на их основе. Работы ведутся как по государственным программам РФ, так и по заказам ведущих предприятий авиационно-космического комплекса России и мира.

В 1994 г. ВИАМ присвоен статус Государственного научного центра РФ, многократно затем им подтвержденный.

За разработку и создание материалов для авиационно-космической и других видов специальной техники 233 сотрудникам ВИАМ присуждены звания лауреатов различных государственных премий. Изобретения ВИАМ отмечены наградами на выставках и международных салонах в Женеве и Брюсселе. ВИАМ награжден 4 золотыми, 9 серебряными и 3 бронзовыми медалями, получено 15 дипломов.

Возглавляет институт лауреат государственных премий СССР и РФ, академик РАН, профессор Е.Н. Каблов.

УДК 669.018.95

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-10-5-5

О.И. Гришина¹, В.Н. Кочетов¹, А.А. Шавнев¹, В.М. Серпова¹

АСПЕКТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ВЫСОКОПРОЧНЫХ И ВЫСОКОМОДУЛЬНЫХ ВОЛОКНИСТЫХ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ АВИАЦИОННОГО НАЗНАЧЕНИЯ (обзор)

Представлен обзор металлических композиционных материалов на алюминиевой и титановой матрицах, упрочненных высокопрочными волокнами тугоплавких соединений для использования в конструкциях авиационной техники и космических транспортных системах.

Ключевые слова: *металлический композиционный материал, волокна бора, волокна карбида кремния, интерметаллид титана, титановый сплав, алюминий.*

O.I. Grishina, V.N. Kochetov, A.A. Shavnev, V.M. Serpova

ASPECTS OF APPLICATION OF HIGH-STRENGTH AND HIGH-MODULUS FIBER METAL COMPOSITE MATERIALS FOR AERONAUTICAL PURPOSE (REVIEW)

A review of metal composite materials based on aluminum and titanium matrixes, reinforced with high-strength fibers of refractory compounds for application in constructions of aerotechnics and space transport systems is presented.

Keywords: *metal composite material, boron fibers, silicon carbide fibers, titanium intermetallic, titanium alloy, aluminum.*

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

Ключевыми проблемами создания перспективной авиационной техники являются разработка и внедрение новых газотурбинных двигателей (ГТД), обладающих высоким уровнем тяги, весовым и эксплуатационным совершенством, уменьшенной номенклатурой деталей при обеспечении более высокого ресурса, надежности и экономичности

[1–8], а также совершенствование летно-тактических характеристик самолетов и снижение их радиолокационной заметности [9–11].

Разработка и создание легких, высокопрочных и высокомодульных волокнистых металлических композиционных материалов (МКМ) – эффективный путь решения поставленных задач.

Металлические композиционные материалы на основе алюминиевых сплавов

Обладающие высокими удельными характеристиками прочности и жесткости МКМ на основе легких матриц, в первую очередь алюминиевых, считаются наиболее перспективным классом конструкционных материалов для использования в двигателях гражданских самолетов, космических системах, различных видах вооружения и другой техники нового поколения. Их создание является одним из важнейших достижений в области материаловедения последних трех десятилетий. Благодаря применению МКМ на основе алюминиевого сплава удалось обеспечить снижение массы деталей и элементов конструкций на 15–50%, в 1,5–2 раза повысить их жесткость и усталостные характеристики по сравнению с металлическими прототипами, при этом повышается эффективность и конструкционная надежность, а при сопоставлении с полимерными композиционными материалами – существенно снижается стоимость эксплуатации [12–16].

Одним из первых волокнистых композиционных материалов, который создавался с этапа научно-исследовательской работы до практического применения, является МКМ на основе алюминиевого сплава, армированный керновыми волокнами бора. Из данного МКМ были изготовлены и прошли успешные стендовые испытания лопатки вентилятора двигателя 7T8D фирмы Pratt&Whitney. Эти лопатки при одинаковых размерах на 40% легче титановых [17].

В 1975 г. разрабатывались боралюминиевые лопатки для двигателя F-100 [18, 19]. В том же году на авиационной базе ВВС США в Райт-Петерсон проводились успешные полеты самолета F-11D, на котором были установлены два двигателя TF-30C фирмы Pratt&Whitney с лопатками 3-й ступени вентилятора из боралюминия, имеющих массу на 40% легче титановых. Лопатки из боралюминия имели титановую оболочку и титановые накладки, образующие замковую часть, на входную кромку которых было нанесено никель-кобальтовое эррозионностойкое покрытие [20]. Завершенные в 1978 г. летные испытания этого двигателя показали экономию массы компрессора и двигателя в целом на 30–40%.

Впервые в большом количестве МКМ на алюминиевой матрице применены в конструкции возвращаемого космического аппарата «Спейшатл» [21, 22], центральная часть фюзеляжа которого имела ферменную конструкцию, состоящую из более чем 300 труб, изготовленных из боралюминия с осевым армированием, с титановыми фитингами диаметром от 25 до 67 мм и длиной от 600 до 1900 мм. Применение боралюминия позволило снизить массу ферменной конструкции на 44% по сравнению с первоначальной конструкцией из алюминиевого сплава [23–25].

Советскими специалистами для самолетов Антонова из боралюминиевого МКМ разработаны и широко используются трубчатые раскосы в конструкции шасси самолета «Руслан», а изготовленные сварные балки самолета Ан-70 прошли успешные испытания (рис. 1) [26].

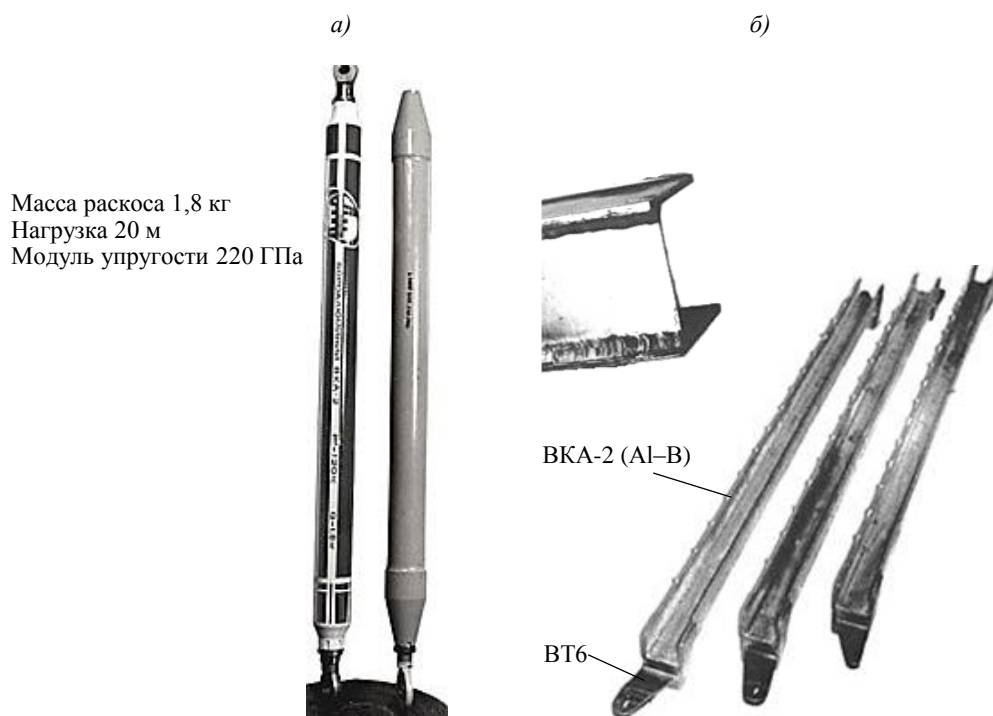


Рисунок 1. Трубчатые раскосы в конструкции шасси самолета «Руслан» (а) и сварные балки самолета Ан-70 (б) [26]

Для целей гражданской авиации российскими специалистами проведен комплекс научно-исследовательских работ по разработке технологии изготовления ширококордной пустотелой лопадки вентилятора, усиленной несущими нагрузку стержнями из боралюминиевого МКМ для двигателей ближне-среднемагистральных самолетов (рис. 2).

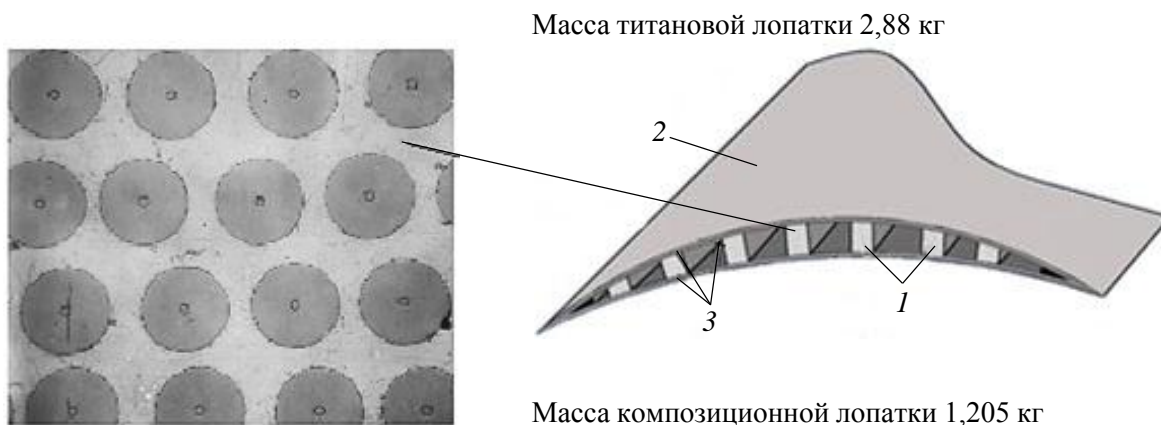


Рисунок 2. Конструкция полый лопатки с несущими нагрузку стержнями из металлического композиционного материала А1–В:

1 – несущие стержни из композиционного материала; 2 – титановая оболочка; 3 – места соединения

Проведен также комплекс мероприятий по коррозионной и эррозионной защите лопаток вентилятора. Изготовленные с применением боралюминиевого МКМ широкохордные лопатки вентилятора прошли успешные стендовые испытания. Свойства боралюминиевого МКМ марки ВКА-2 представлены в табл. 1.

Таблица 1

Свойства боралюминиевого МКМ марки ВКА-2

Характеристика	Температура испытания, °С	Значения характеристик	Характеристика	Температура испытания, °С	Значения характеристик
σ^{\parallel} , МПа	20	1250	$G_{сж}$, МПа	20	2000
	100	1250	$E_{сж}$, ГПа	20	220
	200	1100	$\tau_{в}$, МПа	20	145
	300	1050		250	95
	400	830		350	27
σ^{\perp} , МПа	200	180	σ_{100} , МПа	100	1150
	250	145		150	1050
	350	48		250	850
E^{\parallel} , МПа	20	220		300	800
	200	185		400	700
	300	170	$\sigma_{в.н.}$, МПа	20	1700
E^{\perp} , МПа	20	100	a^{\parallel} , Дж/м ²	20	30
δ^{\parallel} , %	20	0,5	a^{\perp} , Дж/м ²	20	3,0
δ^{\perp} , %	20	0,4	K_c^y , МПа $\sqrt{м}$	20	125
μ^{\parallel}	20	0,21	σ_{-1}^* , МПа	20	650
μ^{\perp}	20	0,10	σ_{-1}^{**} , МПа	20	400

G , ГПа	20	48	$\sigma_{\text{МЦУ}}^{***}$, МПа	20	950
-----------	----	----	-----------------------------------	----	-----

* Предел выносливости при чистом изгибе на базе $2 \cdot 10^7$ циклов на образцах с надрезом (50%-ная несущая способность).

** Предел выносливости при консольном изгибе на базе $1 \cdot 10^7$ циклов (падение резонансной частоты – на 5%).

*** Малоцикловая усталость при осевой нагрузке на базе $1 \cdot 10^4$ циклов.

Перспективные металлические композиционные материалы на основе титановых сплавов, в том числе интерметаллида титана

Поскольку термической границей использования боралюминиевого композиционного материала (КМ) является температура 350–400°C, обусловленная тепловой работоспособностью матричных алюминиевых сплавов и предельным температурным значением длительной эксплуатации МКМ без химического взаимодействия волокна с матрицей, при разработке перспективных газотурбинных двигателей на рабочие температуры до 500–700°C необходимость разработки МКМ на основе титановых сплавов приобретает особую значимость. Использование МКМ на титановых, в том числе интерметаллидной, матрицах, обладающих низкой плотностью и высокими удельными характеристиками прочности и жесткости, в лопатках компрессора низкого и высокого давления позволяет снизить массу лопаток на 30% по сравнению с лопатками из неупрочненных титановых сплавов (табл. 2) и никелевых суперсплавов (рис. 3, табл. 3) [27–30].

Таблица 2

Сравнительные характеристики титановых сплавов и МКМ на их основе

Показатель	Значения показателей				
	титанового сплава [29]			системы Ti–МКМ	
	BT20	BT6	BT18V	по данным FMW Composites Systems* [27]	по данным центра DLR** [28]
Плотность, г/см ³	4,45	4,43	4,55	3,93	3,9–4,2
E , ГПа	105–110	113	116–120	200	160–230
σ_b , МПа	950–1150	930–1000	970	1690 (вдоль волокна) 400 (поперек волокна)	1700–2400
ТКЛР: $\alpha \cdot 10^6$, К ⁻¹	8,3	8,41	–	5,9	4–6
Максимальная температура эксплуатации, °C	500	400–450	–	538	–

* Титановая матрица системы Ti–6Al–4V+волокна SiC марки SCS-6 (объемное содержание волокон в матрице 35%).

** То же с объемным содержанием волокон в матрице 28–38%.

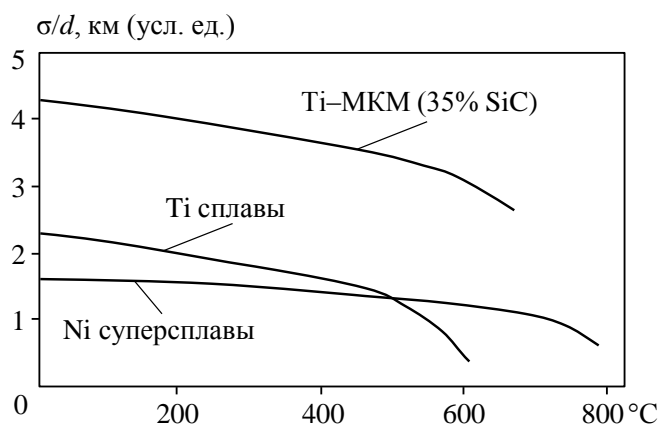


Рисунок 3. Преимущества МКМ на титановой матрице по сравнению с титановыми сплавами и никелевыми суперсплавами [27]

Таблица 3

Сравнительные характеристики МКМ на титановой и интерметаллидной матрицах и никелевого суперсплава [28, 29]

Показатель	Значения показателей		
	Ti/SiC (волокно)	TiAl/SiC (волокно)	Ni суперсплава
Плотность, г/см ³	4,04	4,18	8,3
Модуль упругости, ГПа:			
– вдоль волокна	200	242	207
– поперек волокна	145	200	207
Максимальная температура эксплуатации, °С	538	760	1090

В настоящее время зарубежными фирмами в качестве матричного сплава при изготовлении МКМ на титановой и интерметаллидной матрицах, армированных непрерывными волокнами карбида кремния, а также изделий из них широко используют ($\alpha+\beta$)- и β -титановые сплавы и титаново-алюминидные сплавы (табл. 4) [29].

Таблица 4

Основные матричные сплавы для МКМ на титановой и интерметаллидной матрицах и их свойства [29, 30]

Сплав	Химический состав	Плотность, г/см ³	E, ГПа	$\sigma_{в}$, МПа	Рабочая температура, °С
Сплавы, близкие к α -сплавам					
Ti-6242S	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo-0,1Si	4,55	114	1100	480-520
Timetal 834	Ti-5,8Al-4Sn-3,5Zr-0,7Nb-0,5Mo-0,35Si-0,06C		120	1030 (20°C) 600 (600°C)	
Ti-1100	Ti-5,9Al-2,6Sn-3,8Zr-0,4Mo-0,45Si		112	1010-1050	
Сплавы $\alpha+\beta$					
Ti-64	Ti-6Al-4V	4,43	110-140	900-1200	–
Ti-6-2-4-6	Ti-6Al-2Sn-4Zr-6Mo		114	1100-1200	
Метаустойчивые β -сплавы					
Ti-15-3	Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn	4,76	80-100	800-1100	–
b-21S	Ti-15Mo-2,7Nb-3Al-0,2Si		–	900-1200	
α_2 (Ti ₃ Al)-сплавы					
Супер- α_2	Ti-25Al-10Nb-3V-1Mo	–	–	900-1100	520-550
γ (TiAl)-сплав					
γ -сплав	Ti-48Al-2Cr-2Nb	3,85-4,2	–	–	600-650
Орторомбический сплав (Ti ₂ AlNb)					
Ti-22-25	Ti-22Al-25Nb	5,2	160-176	–	650-700



Рисунок 4. Диск компрессора типа «bling» (фирма Rolls-Royce, Великобритания) [31]
Металлический композиционный материал на основе титана широко используется для дисков компрессора. Многие компании, такие как Rolls-Royce, Snecma, MTU, Aeroengines, GmBH и т. д., осуществили переход от конструкции диска компрессора типа «blisk» к конструкции типа «bling» (рис. 4), что позволяет снизить массу конструкции на 40% при увеличении динамических характеристик [31].

Следует отметить, что, несмотря на очевидные преимущества перед традиционными материалами, рост применения МКМ на основе титановых сплавов сдерживается их ценой. Однако развитие этих материалов для создания новых газотурбинных двигателей является наиболее перспективным направлением. Например, по заказу ВВС США компания FMW Composite Systems Inc., являющаяся одной из ведущих компаний США в области создания композиционных материалов на основе титановых сплавов, армированных волокнами карбида кремния, а также изготовления изделий из них, производит поршни приводного механизма для двигателя PWF119 самолета F-22A (рис. 5, а) и серийно – тяги управления створками для двигателя GEF110 самолета F-16 (см. рис. 5, б) [31].

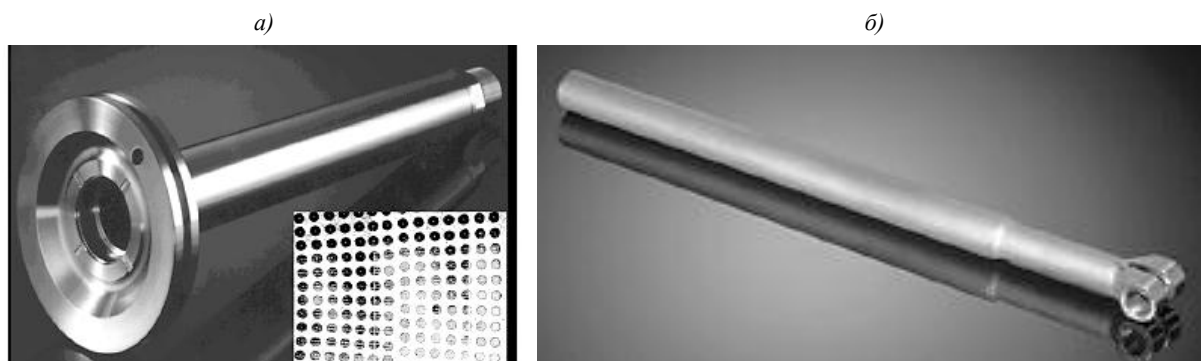


Рисунок 5. Поршень приводного механизма сопла ГТД PWF119 (а)
и тяга управления створками сопла ГТД GEF110 (б) [30]

Большинство зарубежных двигателе- и авиастроительных фирм к настоящему времени практически имеют в своем распоряжении достаточно эффективные промышленные технологии изготовления наиболее типичных и ответственных деталей и конструкций из МКМ на основе титановых сплавов. Так, фирма Rolls-Royce (Великобритания) выполнила программу разработки и оценки титановых МКМ, армированных непрерывными волокнами карбида кремния, применительно к деталям для нового поко-

ления ГТД. Проведенными испытаниями подтверждена возможность снижения массы лопаток компрессора низкого и высокого давления на 30% по сравнению с лопатками из неупрочненных титановых сплавов.

Одновременно фирма Rolls-Royce оценивает возможность использования МКМ на основе титановых сплавов для изготовления лопастей вентилятора, что позволит увеличить их размер без увеличения массы, скорость вращения и, в конечном итоге, мощность ступени. Снижение относительной массы лопастей приведет к дальнейшему облегчению дисков, кожухов и опорной конструкции [31].

Голландская компания SP Aerospace, входящая в группу Stork Fokker, в 2003 г. провела успешные работы по замене деталей основного шасси истребителя F-16 Королевских ВВС Нидерландов на детали из МКМ на титановой матрице [32].

Поскольку температурные возможности титановых и никелевых сплавов, по всей вероятности, достигли максимума, разработчики сконцентрировали внимание на разработке МКМ на основе интерметаллидов титана, армированных разнообразными высокопрочными наполнителями, среди которых наиболее часто встречаются непрерывные керновые волокна карбида кремния.

В течение последних лет растет интерес к МКМ на основе интерметаллидов титана, таких как $TiAl$ или Ti_3Al , благодаря сочетанию низкой плотности и высоких прочностных характеристик при повышенных температурах ($>600^\circ C$), хорошей стойкости к окислению и ползучести [33].

Основную заинтересованность в таких разработках проявляют космические и военные ведомства. В частности, у NASA отмечен ряд документов, в которых содержатся результаты исследований γ -алюминидов титана в качестве основы для изготовления компонентов двигателей [34].

Заключение

Проведенный анализ состояния внедрения зарубежными фирмами высокопрочных и высокомодульных МКМ авиационного и космического назначения показывает широкое применение металлических композиционных материалов на алюминиевой и титановой матрицах, в том числе интерметаллидов титана, упрочненных высокопрочными волокнами тугоплавких соединений, обладающих улучшенной прочностью на единицу массы.

Используемые в двигателях военных и гражданских самолетов, а также космических системах МКМ на алюминиевой и титановой матрицах обеспечивают повыше-

ние эксплуатационных характеристик, а также снижение массы деталей и элементов конструкций.

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н. Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 7–17.
2. Каблов Е.Н. Современные материалы – основа инновационной модернизации России //Металлы Евразии. 2012. №3. С. 10–15.
3. Каблов Е.Н. Разработки ВИАМ для газотурбинных двигателей и установок //Крылья Родины. 2010. №4. С. 31–33.
4. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. Материалы для высоконагруженных деталей газотурбинных двигателей //Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2011. №SP2. С. 13–19.
5. Каблов Е.Н., Герасимов В.В., Висик Е.М., Демонис И.М. Роль направленной кристаллизации в ресурсосберегающей технологии производства деталей ГТД //Труды ВИАМ. 2013. №3. Ст. 01 (viam-works.ru).
6. Металлические композиционные материалы /В кн. История авиационного материаловедения. ВИАМ – 80 лет: годы и люди /Под общ. ред. Е.Н. Каблова. М.: ВИАМ. 2012. С. 373–380.
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. 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.
9. Дорошенко Н.И., Чурсова Л.В. Эволюция материалов для лопастей вертолетов //Авиационные материалы и технологии. 2012. №2. С. 16–18.
10. 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 (viam-works.ru).
11. Каблов Е.Н. Авиакосмическое материаловедение //Все материалы. Энциклопедический справочник. 2008. №3. С. 2–14.

12. Каблов Е.Н., Бондаренко Ю.А., Ечин А.Б., Сурова В.А. Развитие процесса направленной кристаллизации лопаток ГТД из жаропрочных сплавов с монокристаллической и композиционной структурой //Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 3–8.
13. Белов Н.А. Экономнолегированные жаропрочные алюминиевые сплавы: принципы оптимизации фазового состава //Авиационные материалы и технологии. 2011. №2. С. 6–11.
14. Ковтунов А.И., Мямин С.В. Исследование технологических и механических свойств слоистых титаноалюминиевых композиционных материалов, полученных жидкофазным способом //Авиационные материалы и технологии. 2013. №1. С. 9–12.
15. Каблов Е.Н., Щетанов Б.В., Гращенков Д.В., Шавнев А.А., Няфкин А.Н. Металломатричные композиционные материалы на основе Al–SiC //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 373–380.
16. 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.
17. Pratt and Whitney Composite Rotor Test //Interavia Air Letter. 1973. V. 7. №7881. P. 5–6.
18. Niema I.T., Garrett R.A. Eutectic Bonding of Boron-Aluminum Structural Components //Welding Journal. 1974. V. 53. №4. P. 351–360.
19. Possibility of Composite Compressor Blades Seen in Germany //Interavia Air Letter. 1975. №8188. P. 8–9.
20. Garibotey G.F. Trends in Aerospace Materials //Astronautic and Aeronautics. 1978. V. 16. №7–8. P. 70–81.
21. Adsit N.R. Composites for Space Application //ASTM Standartisation News. 1984. Dec.
22. FDL Begins Aluminum Matrix Composite Structure Program //Light Metal Age. 1981. V. 39. №11. P. 36.
23. Knoell A.G. Evaluation of Boron-Aluminum Tubes in Compoission //J. Spacecraft and Rockets. 1975. V. 12. №10. P. 635–637.
24. Weisinger M.D. Boron-Aluminum Tube Struts for NASA Space Shuttle //Metals Abstracts. 1979. P. 69–72.
25. Stenger C.G. Keramick als Versterking van meltellen //Metal en Techn. 1986. V. 31. №5. P. 9–12.

26. Горшков Л.А., Каримбаев Т.Д., Ножницкий Ю.А. Вопросы создания конструкций ГТД из КМ /В сб. Новые технологические процессы и надежность ГТД. М.: ОНТИ ВИАМ. 1976. Вып. 3. С. 3–10.
27. National Research Council Advanced Fibers for High-Temperature Ceramic Composites: Advanced Materials for the Twenty-First Century /In: Nat. Academy Press. Washington D.C. 1998. P. 37–38.
28. Vienna University of Technology, Institute of Materials Science and Technology. www.mmc-assess.tuwien.ac.at
29. MMC VIII-Metallic Composites and Foams. London: Royal Society. 2001.
30. Шалин Р.Е., Ильченко В.М. Титановые сплавы в авиационном приборостроении, <http://www.titanmet.ru>.
31. Smarsly W. Aero Engine Materials /In: Seminar, Faculty of Mechanical Engineering, Cracow University of Technology. Poland MTU Aero engines GmbH (2006), http://www.mtu.de/en/technologies/engineering_news.
32. Miracle D.B. Aeronautical Applications of Metal-Matrix Composites. Air Force Research Laboratory. 2000. P. 1043–1049.
33. Hemptenmacher J., Schurmann H., Weber K., Peters P.W.M. Gefügeuntersuchungen und mechanische Eigenschaften der SiC (SCS-6) faserverstärkten Titanlegierung Ti–22Al–25Nb. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR, Institut für Werkstoff-Forschung, Köln; Symposium: Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, Kassel. 2005.
34. NASA TM-2001-211343, NASA Reference Publication. 1361 p.

REFERENCES LIST

1. Kablov E.N. Strategicheskie napravlenija razvitija materialov i tehnologij ih pererabotki na period do 2030 goda [Strategic directions of development of materials and technologies to process them for the period up to 2030] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №5. S. 7–17.
2. Kablov E.N. Sovremennye materialy – osnova innovacionnoj modernizacii Rossii [Modern materials – the basis of innovative modernization of Russia] //Metally Evrazii. 2012. №3. S. 10–15.
3. Kablov E.N. Razrabotki VIAM dlja gazoturbinnih dvigatelej i ustanovok [VIAM development for gas turbine engines and systems] //Kryl'ja Rodiny. 2010. №4. S. 31–33.

4. Kablov E.N., Ospennikova O.G., Bazyleva O.A. Materialy dlja vysokonagruzhennyh detalej gazoturbinyh dvigatelej [Materials for highly loaded parts of gas turbine engines] //Vestnik MGTU im. N.Je. Baumana. 2011. №SP2. S. 13–19.
5. Kablov E.N., Gerasimov V.V., Visik E.M., Demonis I.M. Rol' napravlennoj kristalizacii v resursoberegajushhej tehnologii proizvodstva detalej GTD [The role of directional solidification in the resource-saving technology of production of gas-turbine] //Trudy VIAM. 2013. №3. St. 01 (viam-works.ru).
6. Metallicheskie kompozicionnye materialy [Metal composite materials] /V kn. Istorija aviacionnogo materialovedenija. VIAM – 80 let: gody i ljudi /Pod obshh. red. E.N. Kablova. M.: VIAM. 2012. S. 373–380.
7. Tarasov Ju.M., Antipov V.V. Novye materialy VIAM – dlja perspektivnoj aviacionnoj tehniki proizvodstva OAO «OAK» [New materials VIAM – for promising aviation equipment produced by OJC «UAC»] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №2. S. 5–6.
8. Shmotin Ju.N., Starkov R.Ju., Danilov D.V., Ospennikova O.G., Lomberg B.S. Novye materialy dlja perspektivnogo dvigatelja OAO «NPO „Saturn”» [New materials for advanced engine OJC «SPA „Saturn”»] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №2. S. 6–8.
9. Doroshenko N.I., Chursova L.V. Jevoljucija materialov dlja lopastej vertoletov [Evolution of materials for helicopter blades] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №2. S. 16–18.
10. Kablov E.N., Shhetanov B.V., Ivahnenko Ju.A., Balinova Ju.A. Perspektivnye armirujushhie vysokotemperaturnye volokna dlja metallicheskih i keramicheskikh kompozicionnyh materialov [Promising reinforcing fibers for high temperature metal and ceramic composite materials] //Trudy VIAM. 2013. №2. St. 05 (viam-works.ru).
11. Kablov E.N. Aviakosmicheskoe materialovedenie [Aerospace materials] //Vse materialy. Jenciklopedicheskij spravocnik. 2008. №3. S. 2–14.
12. Kablov E.N., Bondarenko Ju.A., Echin A.B., Surova V.A. Razvitie processa napravlennoj kristalizacii lopatok GTD iz zharoprochnyh splavov s monokristallicheskoj i kompozicionnoj strukturoj [The development process of directional solidification of gas turbine engine blades with a single-crystal superalloys and composite structure] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №1. S. 3–8.
13. Belov N.A. Jekonomnolegirovannye zharoprochnye aljuminievye splavy: principy optimizacii fazovogo sostava [Ehkonomnolegirovannye heat-resistant aluminum alloys:

- principles of optimization phase composition] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2011. №2. S. 6–11.
14. Kovtunov A.I., Mjamin S.V. Issledovanie tehnologicheskikh i mehanicheskikh svojstv sloistykh titanoaljuminiyevykh kompozicionnykh materialov, poluchennykh zhidkofaznym sposobom [Investigation of processing and mechanical properties titanoaljuminiyevykh layered composite material obtained by the liquid phase method] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №1. S. 9–12.
 15. Kablov E.N., Shhetanov B.V., Grashhenkov D.V., Shavnev A.A., Njafkin A.N. Metal-lomatrichnye kompozicionnye materialy na osnove Al–SiC [Metal matrix composites based on Al–SiC] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 373–380.
 16. Kablov E.N., Chibirkin V.V., Vdovin S.M. Izgotovlenie, svojstva i primeneniye teplootvodjashhih osnovanij iz MMK Al–SiC v silovoj jelektronike i preobrazovatel'noj tehnike [Manufacture, properties and applications of heat-removing bases from MMK Al–SiC in power electronics and converter equipment] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №2. S. 20–22.
 17. Pratt and Whitney Composite Rotor Test //Interavia Air Letter. 1973. V. 7. №7881. P. 5–6.
 18. Niema I.T., Garrett R.A. Eutecnic Bonding of Boron-Aluminum Structural Components //Welding Journal. 1974. V. 53. №4. P. 351–360.
 19. Possibility of Composite Compressor Blades Seen in Germany //Interavia Air Letter. 1975. №8188. P. 8–9.
 20. Garibotey G.F. Trends in Aerospace Materials //Astronautic and Aeronautics. 1978. V. 16. №7–8. P. 70–81.
 21. Adsit N.R. Composites for Space Application //ASTM Standartisation News. 1984. Dec.
 22. FDL Begins Aluminum Matrix Composite Structure Program //Light Metal Age. 1981. V. 39. №11. P. 36.
 23. Knoell A.G. Evaluation of Boron-Aluminum Tubes in Compossion //J. Spacecraft and Rockets. 1975. V. 12. №10. P. 635–637.
 24. Weisinger M.D. Boron-Aluminum Tube Struts for NASA Space Shuttle //Metals Abstracts. 1979. P. 69–72.
 25. Stenger C.G. Keramick als Versterking van meltellen //Metal en Techn. 1986. V. 31. №5. P. 9–12.

26. Gorshkov L.A., Karimbaev T.D., Nozhnickij Ju.A. Voprosy sozdanija konstrukcij GTD iz KM [Questions to create structures of GTD KM] /V sb. Novye tehnologicheskie processy i nadezhnost' GTD. M.: ONTI VIAM. 1976. Vyp. 3. S. 3–10.
27. National Research Council Advanced Fibers for High-Temperature Ceramic Composites: Advanced Materials for the Twenty-First Century /In: Nat. Academy Press. Washington D.C. 1998. P. 37–38.
28. Vienna University of Technology, Institute of Materials Science and Technology. www.mmc-assess.tuwien.ac.at
29. MMC VIII-Metallic Composites and Foams. London: Royal Society. 2001.
30. Shalin R.E., Il'chenko V.M. Titanovye splavy v aviacionnom priborostroenii [Titanium alloys in aircraft instrumentation]. <http://www.titanmet.ru>.
31. Smarsly W. Aero Engine Materials /In: Seminar, Faculty of Mechanical Engineering, Cracow University of Technology. Poland MTU Aero engines GmbH (2006), http://www.mtu.de/en/technologies/engineering_news.
32. Miracle D.B. Aeronautical Applications of Metal-Matrix Composites. Air Force Research Laboratory. 2000. P. 1043–1049.
33. Hemptenmacher J., Schurmann H., Weber K., Peters P.W.M. Gefügeuntersuchungen und mechanische Eigenschaften der SiC (SCS-6) faserverstärkten Titanlegierung Ti–22Al–25Nb. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, DLR, Institut für Werkstoff-Forschung, Köln; Symposium: Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, Kassel. 2005.
34. NASA TM-2001-211343, NASA Reference Publication. 1361 p.