УДК 621.775.8

Д.П. Фарафонов[1], М.Л. Деговец[1], Р.Ш. Алешина[1]

МЕТАЛЛИЧЕСКИЕ ВОЛОКНА ИЗ ЖАРОСТОЙКИХ СПЛАВОВ, ЛЕГИРОВАННЫХ МЕТАЛЛАМИ ПЛАТИНОВОЙ ГРУППЫ

DOI: 10.185.77/2071-9140-2016-0-1-44-52

Пористоволокнистые металлические материалы обладают уникальными свойствами, позволяющими применять их в качестве эффективных истираемых уплотнений и элементов звукопоглощающих конструкций авиационных ГТД. Однако для внедрения такого типа материалов в конструкции современных и перспективных ГТД необходимо решение вопроса о повышении стойкости тонких металлических волокон к высокотемпературной коррозии и окислению. С этой целью в ВИАМ проводятся работы по исследованию и разработке металлических волокон из жаростойких сплавов, легированных металлами платиновой группы, отличающихся высокой стойкостью к окислению и пластичностью. Приведены результаты исследований волокон, полученных из жаростойких сплавов, легированных металлами платиновой группы, методом экстракции висящей капли расплава.

Ключевые слова: *металлические волокна, пористоволокнистый металлический материал, жаростойкость, газотурбинный двигатель.*

The properties of porous materials from metal fibers allow their applying as effective abradable seals and elements of sound-proof structures of aviation GTE. However, high-temperature corrosion and oxidation resistance of these materials has to be improved to apply them in modern and advanced GTE. The metal fibers from heat-resistant alloys alloyed by platinum group metals which can have high oxidation resistance and plasticity are researched and developed at VIAM. First results of researches of such fibers obtained from heat-resistant alloys alloyed by platinum group metals by method of hanging liquid-alloy droplet extraction are given in the article.

Keywords: *metal fibers, porous and fibrous metal material, high-temperature oxidation resistance, gas-turbine engine.*

[1]Федеральное 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

Возникновение новой области металлургии – металлургии волокон – относится к середине XX века, когда впервые из коротких металлических волокон были изготовлены фильтры большой пористости, щетки контактных колец и фрикционные детали с использованием технологий, применяемых в порошковой металлургии и при производстве бумаги.

Основными преимуществами пористых материалов из металлических волокон перед материалами, изготавливаемыми из спеченных металлических порошков, являются их высокие пластичность и соотношение прочности к пористости.

В настоящее время металлические волокна и материалы из них получили широкое распространение в машиностроении, энергомашиностроении, химической отрасли. Они применяются для изготовления фильтров очистки жидкостей и газов, катализаторов, армирующих элементов композиционных материалов, демпферов, звукопоглощающих конструкций и др.

В ВИАМ приблизительно 10 лет развивается новое материаловедческое направление – высокотемпературные пористоволокнистые материалы из металлических волокон (ПВММ) для газотурбинных двигателей (ГТД). Пока они нашли применение при создании звукопоглощающих материалов для защиты горячего тракта ГТД и истираемых материалов для уплотнений радиальных зазоров в проточной части [1].

По сравнению с другими пористыми материалами (металлические порошки, керамика, минеральная вата, полимерная и металлическая пена и др.) ПВММ обладают оптимальным сочетанием свойств, необходимых для гомогенного глушителя шума в звукопоглощающих конструкциях авиационного двигателя [2]. Помимо высокой акустической эффективности они характеризуются высокой прочностью, сочетающейся с пластичностью, пористостью – до 98%, низкой плотностью. Благодаря использованию волокон из жаро- и коррозионностойких сплавов ПВММ могут длительно эксплуатироваться при температурах до 700°С и выше.

Наиболее прогрессивным методом получения металлических волокон является безфильерная разливка металла на охлаждаемую поверхность. Его разновидностью является метод экстракции висящей капли расплава (ЭВКР), который

характеризуется высокой производительностью и позволяет изготавливать как длинномерное волокно, так и дискретные частицы игольчатой формы из тугоплавких, жаро-, коррозионностойких и труднодеформируемых сталей и сплавов и химически активных металлов, благодаря бестигельной плавке [3].

Дискретные волокна из жаростойких сплавов систем Ni–Cr–Al, Ni–Cr–Al–Y и Fe–Cr–Al–Y, полученные методом ЭВКР в МАТИ–РГТУ им. К.Э. Циолковского, позволили разработать в ВИАМ принципиально новые истираемые уплотнительные материалы, не имеющие аналогов по уровню эксплуатационных свойств, с рабочими температурами до 900°С [4–7].

Необходимость в создании таких материалов вызвана требованиями к двигателям ГТД по уменьшению удельного расхода топлива. Повышение КПД газотурбинного двигателя и уменьшение удельного расхода топлива во многом зависят от величины радиальных зазоров турбины. Утечка каждого процента расхода газа в радиальный зазор приводит к равному по величине (в процентах) уменьшению КПД ступени турбины. Согласно зарубежным исследованиям до 5% КПД двигателя снижается за счет утечек из-за повышенных радиальных зазоров. Однако уменьшение радиальных зазоров связано с опасностью соприкосновения торцов лопаток с деталями статора вследствие маневров самолета, перегрузок при взлете и посадке, колебаний ротора и корпуса при работе на нерасчетных режимах, различий температур вращающихся деталей и неподвижных частей уплотнений, скрутки ротора, деформации корпуса, вибрации и др.

С целью уменьшения радиальных зазоров используют специальные (истираемые) материалы, которые наносят на поверхность статора. Наряду с высокой истираемостью они должны обладать рядом других физико-механических и триботехнических свойств, удовлетворяющих реальным условиям работы двигателя. Разработка уплотнительного материала, в котором высокая истираемость (характеризующаяся соотношением износов уплотнения и лопатки не менее 5:1) сочетается с высокими термо- и эрозионной стойкостью и другими характеристиками, является одной из наиболее актуальных задач авиационного материаловедения.

Существующие серийные материалы, которые используются в интервале рабочих температур от 600 до 1100°С, имеют соотношение износов от 2:1 до 4:1. Такие материалы не позволяют уменьшить зазоры. Кроме того, при использовании их имеет место существенный износ торцов рабочих лопаток.

По результатам проведенных в ВИАМ сравнительных испытаний установлено, что истираемость новых уплотнительных материалов из металлических волокон составляет не менее 10:1, что превосходит все существующие аналоги [4].

Учитывая уникальные свойства материалов из металлических волокон, перспективным направлением их дальнейшего развития является повышение рабочих температур, так как температуры деталей горячего тракта большинства современных ГТД достигают 1100°С и более и в перспективе будут увеличиваться [8].

Однако повышение рабочих температур пористоволокнистых металлических материалов является достаточно сложной задачей. Уровень эксплуатационных свойств звукопоглощающих и истираемых волокнистых материалов, как правило, выше при меньших диаметрах волокон. Максимально допустимый диаметр или толщина волокон для получения материалов с необходимыми свойствами составляет 80–100 мкм, поэтому основным фактором, влияющим на возможность повышения рабочих температур пористоволокнистых металлических материалов, является жаростойкость волокон (стойкость к высокотемпературному окислению). По результатам исследований установлено, что волокна толщиной 30–50 мкм, полученные из наиболее жаростойких промышленных сплавов систем Ni–Cr–Al и Fe–Cr–Al, при температурах >900°С полностью (насквозь) окисляются, что приводит к разрушению изготовленного из них материала при незначительных нагрузках.

Тем не менее результаты проведенных в ВИАМ работ и данные зарубежной научно-технической литературы свидетельствуют, что возможность повышения стойкости к высокотемпературному окислению металлических волокон и материалов из них существует.

Исследовательскими организациями AMPAC и MMAE (США) разработан способ повышения жаростойкости металлических волокон из сплава системы Fe–Cr–Al–Y путем нанесения на поверхность волокон покрытия из оксида титана, которое препятствует росту метастабильных фаз γ-Al_2O_3, δ-Al_2O_3 и θ-Al_2O_3 и способствует образованию чистого стабильного защитного слоя α-Al_2O_3. Жаростойкость таких волокон значительно повышается при температурах >900°С [9].

В ВИАМ разработан состав жаростойкого керамического покрытия и технология его нанесения на заготовки пористоволокнистого металлического материала, обеспечивающая образование тонкой защитной пленки на волокнах во всем объеме материала без значительного уменьшения пористости. Применение такого покрытия позволяет повысить рабочую температуру уплотнения до 1100°С, при этом истираемость материала уменьшается в ~2 раза (в среднем до 5:1) [10–12].

Повышение жаростойкости материалов из металлических волокон без ухудшения их эксплуатационных характеристик возможно также благодаря использованию для изготовления волокон новых (более жаростойких) сплавов. При этом необходимо учитывать следующие требования к

волокнам: толщина – не более 80–100 мкм; пластичность – не менее 2–3 изгибов на 180 град до разрушения, которая необходима для формования заготовок уплотнительного материала прессованием волокон и обеспечения высоких эксплуатационных свойств.

Европейскими организациями MTU Aero Engines GmbH (Германия), AVIO S.P.A. (Италия), Rolls-Royce plc (Великобритания), Fraunhofer Institut IF AM (Германия), Siemens Industrial Turbines Ltd (Великобритания) и другими в рамках совместного проекта ADSEALS в 1999–2005 гг. проведены исследования различных материалов для применения их в качестве истираемых уплотнений нового поколения. В частности, проведено сравнение эксплуатационных характеристик материалов из металлических волокон и сот из сплавов на основе системы Fe–Cr–Al, таких как Aluchrom YHf, Haynes 230, PM2000, PM2Hf, а также пористых керамических материалов. Результаты проведенных исследований показывают, что наибольшей эффективностью по истираемости обладают материалы из металлических волокон, а сплавы на основе системы Fe–Cr–Al превосходят по жаростойкости в интервале температур 700–1200°C сплавы на никелевой основе, применяемые для изготовления серийных тонкостенных сотовых уплотнений. Наибольшую жаростойкость имели сплавы, дисперсноупрочненные частицами оксида иттрия (PM2000 и PM2Hf). Однако полученные из них материалы имели худшую истираемость, так как лопатки или гребешки на торцах лопаток изнашивались абразивными дисперсными частицами, присутствующими в составе сплавов [13, 14].

В ВИАМ проведены исследования возможности получения волокон из интерметаллидных сплавов на основе NiAl и Ni_3Al, обладающих высокой стойкостью к окислению. Из новых интерметаллидных сплавов типа ВКНА были изготовлены волокна, стойкие к окислению при температурах >1000°C. Однако дальнейшие исследования показали, что изготовление из таких волокон истираемого уплотнительного материала методами порошковой металлургии (прессование в пресс-формах с последующим спеканием) затруднено из-за низкой пластичности интерметаллидных сплавов, приводящей к охрупчиванию волокон при прессовании [7, 15–17].

Для разработки волокон и высокотемпературного пористоволокнистого металлического материала на рабочие температуры >1000°C большой интерес представляют жаростойкие сплавы, легированные металлами платиновой группы (МПГ).

Сплавы на основе платины и металлов платиновой группы, обладающие при 1200–1700°C высокой инертностью к воздействию воздушной атмосферы и расплавов оксидов, применяются при изготовлении оборудования для производства оптических стекол, кристаллов, различных видов стеклянных и базальтовых волокон и пр.

Широко применяют для точного измерения температур процессов, проходящих в различных средах, термопары из платины и ее сплавов. К материалу термопар предъявляется ряд требований, включающих достаточно высокую температуру плавления и хорошие технологические свойства, обеспечивающие возможность получения тонкой проволоки, стабильность свойств в широком интервале температур в течение длительного времени. Широкое применение в России и за рубежом нашли термопары из сплавов платины с родием. Отдельные сплавы этой системы надежно работают до 1800°C [18].

Проводятся исследования сплавов на основе платины систем Pt–Al–Cr, Pt–Al–Cr–Ru, Pt–Ir–Ni, разрабатываемых для применения их при изготовлении и ремонте различных деталей ГТД [19, 20].

Сплавы на основе металлов платиновой группы имеют исключительную стойкость к воздействию окружающей среды при сверхвысоких температурах. Однако применение их для изготовления волокон и серийного производства истираемого уплотнительного материала для ГТД при наличии других возможных решений нецелесообразно с экономической точки зрения. Наибольший интерес с технической и экономической точек зрения представляют жаростойкие сплавы, легированные небольшим количеством МПГ (до 15% (атомн.)). В основном разработка и исследования сплавов такого типа проводятся в США, Великобритании и Японии с 1970-х годов. Это жаропрочные сплавы на основе никеля, сплавы систем Co–Cr–Al и Fe–Cr–Al с содержанием платины и других металлов платиновой группы от 0,5 до 20% (атомн.) [21–27].

Роль платины и металлов платиновой группы при окислении жаростойких сплавов аналогична роли гафния в сплавах на основе системы Ni–Cr–Al и иттрия в сплавах системы Fe–Cr–Al – улучшение адгезии пленки Al_2O_3 к поверхности сплава и снижение скорости роста окалины за счет торможения диффузии алюминия и кислорода по границам оксидных зерен.

В ВИАМ начаты исследования по поиску таких сплавов и разработке технологии получения из них волокон для истираемого уплотнительного материала с рабочей температурой до 1400°C для применения в турбинах перспективных ГТД. Методом ЭВКР в МАТИ–РГТУ им. К.Э. Циолковского получены экспериментальные образцы волокон из сплавов на основе никеля и железа, легированных платиной и иридием, исследованы их свойства.

Материалы и методы

По результатам анализа научно-технической информации в области жаростойких сплавов, легированных редкими металлами, в том числе пла-

тиновой группы, проведенного в рамках научного исследования по разработке технологии получения волокон для истираемого уплотнительного материала с рабочей температурой до 1400°С для применения в турбинах перспективных ГТД, для изготовления образцов и проведения сравнительных исследований выбраны экспериментальные составы сплавов на основе систем Ni–Al, Ni–Cr–Al и Fe–Cr–Al, содержащие от 0,5 до 50% (атомн.) платины и иридия.

Индукционную выплавку слитков экспериментальных сплавов массой ~100 г проводили в керамических тиглях в среде проточного аргона при атмосферном давлении с использованием генератора токов высокой частоты. Для получения цилиндрических образцов ∅5 мм (для исследования жаростойкости) проводили вытягивание расплава из тигля в кварцевые трубки с последующей кристаллизацией расплава.

Стойкость к окислению экспериментальных образцов сплавов определяли по увеличению массы образцов, помещенных в керамические тигли, после выдержки их в печи в воздушной среде в течение заданного времени при постоянной температуре (1200 и 1300°С). Для определения закономерности окисления отбор образцов производили через 10, 20, 50 и 100 ч выдержки. Стойкость к окислению сплавов наряду с изменением массы образцов определяется также толщиной, скоростью роста и прочностью сцепления окисленного слоя (окалины) с поверхностью сплава, поэтому оценивали внешний вид окисленных образцов и их микроструктуру.

По результатам исследований выбраны сплавы систем Fe–Cr–Al–0,5Pt; Ni–5Cr–15Al–2,5Pt–0,3Hf; Ni–5Cr–15Al–3Pt–2Ir–0,3Hf для изготовления и исследования экспериментальных образцов волокон. Волокна изготавливали методом ЭВКР в МАТИ–РГТУ им. К.Э. Циолковского.

Для оценки жаростойкости экспериментальных образцов волокон проведены их сравнительные испытания при 1100°С. При проведении испытаний навески волокон массой ~1,5 г помещали в керамические тигли и выдерживали в печи в воздушной среде при температуре 1100°С в течение 100 ч. После выдержки определяли изменение массы волокон и проводили их металлографические исследования на шлифах, полученных заливкой волокон эпоксидной смолой. Вместе с экспериментальными образцами волокон для сравнения испытывали волокна из сплава системы Fe–Cr–Al–Y, применяемые для изготовления истираемого уплотнительного материала с рабочей температурой до 900°С.

Испытания на технологическую пластичность волокон, полученных методом ЭВКР, проводили на 50 образцах волокон методом изгиба (вручную через металлическую линейку с двух концов до взаимного соприкосновения).

Результаты

Для проведения сравнительных испытаний на жаростойкость выплавлены сплавы пяти экспериментальных составов, легированные редкими металлами, в том числе платиновой группы: Ni–Al–15Pt; Ni–5Cr–15Al–2,5Pt–0,1Hf; Ni–5Cr–15Al–3Pt–2Ir–0,3Hf; Fe–Cr–Al–0,5Pt; Fe–Cr–Al–10Pt.

Внешний вид экспериментальных образцов выплавленных сплавов после их выдержки при 1200 и 1300°С в течение 100 ч представлен на рис. 1.

Образцы после испытаний при температуре 1200°С имели плотно прилегающую к поверхности окалину, за исключением образца из сплава системы Ni–Al–15Pt, поверхность которого окислена неравномерно, однако отслоения (осыпания) окалины не наблюдалось.

После испытаний при температуре 1300°С неравномерность окисления поверхности образцов становится более заметной, появляется незначительное количество отслоившейся окалины у образцов из сплавов систем Ni–Al–15Pt; Ni–5Cr–15Al–2,5Pt–0,1Hf и Ni–5Cr–15Al–3Pt–2Ir–0,3Hf. Бóльшая часть поверхности образца из сплава системы Ni–Al–15Pt приобрела металлический блеск, видимо, вследствие диффузии платины к поверхности сплава.

По результатам проведенных испытаний получена зависимость изменения массы образцов от продолжительности их выдержки при температурах 1200 и 1300°С, которая представлена на рис. 2.

По уровню полученных при 1200°С значений жаростойкости все исследуемые сплавы можно охарактеризовать как обладающие высокой стойкостью к окислению. Наименьший привес после выдержки в течение 100 ч при температуре 1200°С имеет сплав системы Ni–5Cr–15Al–2,5Pt–0,1Hf (~7 г/м^2).

Наибольшей жаростойкостью по результатам испытаний при 1300°С обладают сплавы систем Ni–5Cr–15Al–2,5Pt–0,1Hf; Ni–5Cr–15Al–3Pt–2Ir–0,3Hf и Fe–Cr–Al–0,5Pt, изменение массы (привес) которых за 100 ч составляет от 10 до 17 г/м^2. Образцы из сплава системы Ni–Al–15Pt имели заметную убыль массы (~29 г/м^2), что можно объяснить активным испарением образующихся на поверхности сплава летучих оксидов платины (это предположение подтверждается внешним видом образцов из сплава системы Ni–Al–15Pt, бóльшая часть поверхности которых имеет металлический блеск благодаря высокому содержанию платины).

Сравнительный анализ жаростойкости (изменения массы) сплава системы Fe–Cr–Al–0,5Pt и аналогичных свойств серийного жаростойкого сплава системы Fe–Cr–Al (Х23Ю5) приведен на рис. 3. Видно, что дополнительное легирование жаростойкого сплава системы Fe–Cr–Al небольшим количеством платины положительно влияет на его стойкость к окислению при 1300°С.

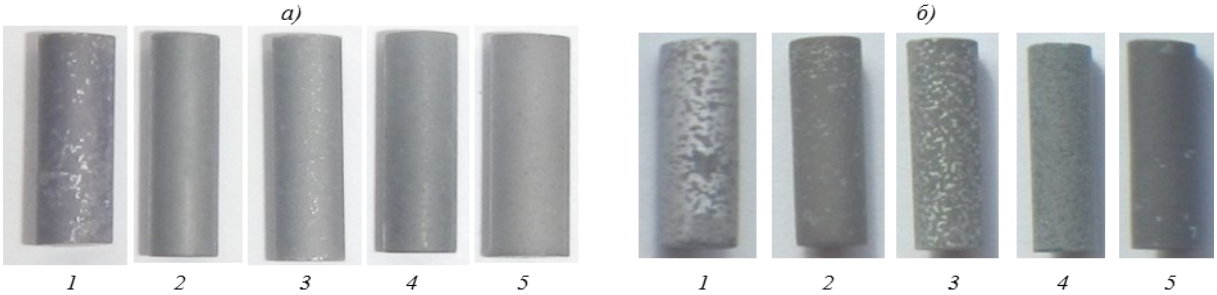

Рис. 1. Внешний вид после испытаний на жаростойкость при 1200 (*а*) и 1300°С (*б*) в течение 100 ч экспериментальных образцов жаростойких сплавов систем: *1* – Ni–Al–15Pt; *2* – Ni–5Cr–15Al–2,5Pt–0,1Hf; *3* – Fe–Cr–Al–0,5Pt; *4* – Ni–5Cr–15Al–3Pt–2Ir–0,3Hf; *5* – Fe–Cr–Al–10Pt

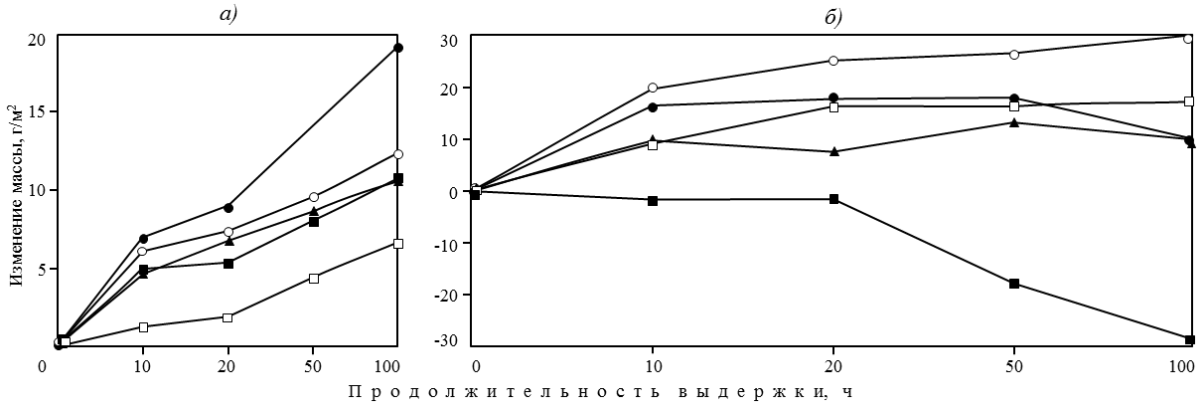

Рис. 2. Изменение массы после испытаний на жаростойкость при 1200 (*а*) и 1300°С (*б*) в течение 100 ч (средние значения) экспериментальных образцов сплавов систем: Ni–Al–15Pt (■), Ni–5Cr–15Al–2,5Pt–0,1Hf (□), Fe–Cr–Al–0,5Pt (▲), Ni–5Cr–15Al–3Pt–2Ir–0,3Hf (●), Fe–Cr–Al–10Pt (○)

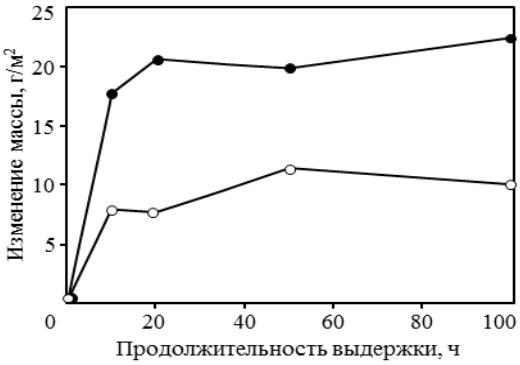

Рис. 3. Изменение массы образцов из сплавов систем Fe–Cr–Al (●) и Fe–Cr–Al–0,5Pt (○) после испытаний их на жаростойкость при 1300°С в течение 100 ч

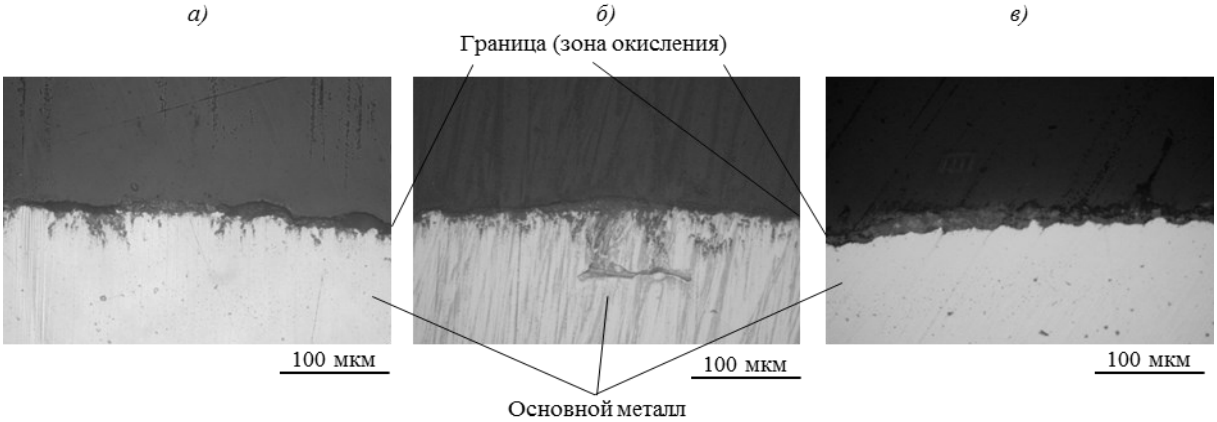

Рис. 4. Микроструктура границ экспериментальных образцов сплавов систем Ni–5Cr–15Al–2,5Pt–0,1Hf (*а*), Ni–5Cr–15Al–3Pt–2Ir–0,3Hf (*б*), Fe–Cr–Al–0,5Pt (*в*) после их испытаний на жаростойкость при 1300°С в течение 100 ч

Рис. 5. Микроструктура экспериментальных образцов волокон (поперечное сечение) из сплава Ni–5Cr–15Al–2,5Pt–0,3Hf, изготовленных методом экстракции висящей капли расплава

Изменение массы экспериментальных образцов волокон после выдержки при 1100°С в течение 100 ч

Сплав (система)	Δm	
	г	%
Ni–5Cr–15Al–2,5Pt–0,3Hf	0,070	4,8
Ni–5Cr–15Al–3Pt–2Ir–0,3Hf	0,064	4,3
Fe–Cr–Al–0,5Pt	0,470	32,5
Fe–Cr–Al–Y (ТУ1-595-3-894–2005)	0,640	45,1

По результатам металлографических исследований образцов, испытанных на жаростойкость, установлено, что на поверхности сплавов систем Ni–5Cr–15Al–2,5Pt–0,1Hf и Ni–5Cr–15Al–3Pt–2Ir–0,3Hf после их окисления при 1300°С в течение 100 ч образуется тонкая оксидная пленка, толщина которой составляет ~(10–15) мкм (средние значения), при этом в отдельных зонах наблюдается проникновение продуктов окисления в сплав на глубину до 40 мкм. На всей поверхности сплава системы Fe–Cr–Al–0,5Pt образуется ровная оксидная пленка, толщина которой несколько больше толщины оксидной пленки на поверхности сплавов на основе никеля (~20 мкм), однако локального проникновения продуктов окисления в сплав не наблюдается.

Микроструктура границ (зон окисления) цилиндрических образцов экспериментальных сплавов после испытаний на жаростойкость при 1300°С в течение 100 ч показана на рис. 4.

Из сплавов систем Ni–5Cr–15Al–2,5Pt–0,3Hf; Ni–5Cr–15Al–3Pt–2Ir–0,3Hf и Fe–Cr–Al–0,5Pt методом ЭВКР в МАТИ–РГТУ им. К.Э. Циолковского удалось получить экспериментальные образцы волокон, толщина которых составила 50–60 мкм (средние значения). Для получения волокон были использованы заготовки в виде прутков диаметром 12–13 мм, которые изготавливали путем выплавки слитков в вакуумной печи, отливки из них пальчиковых заготовок и механической обработки.

Микроструктура отдельных волокон (поперечное сечение) из сплава системы Ni–5Cr–15Al–2,5Pt–0,3Hf показана на рис. 5.

Жаростойкость волокон оценивали по изменению массы испытываемой навески волокон. Изменение массы образцов волокон (средние значения) после их выдержки при 1100°С в течение 100 ч в воздушной атмосфере приведены в таблице.

По результатам проведенных испытаний определено, что наибольшую стойкость к окислению имеют экспериментальные образцы волокон из сплавов систем Ni–5Cr–15Al–2,5Pt–0,3Hf и Ni–5Cr–15Al–3Pt–2Ir–0,3Hf: привес массы составил менее 5%, при этом волокна после испытаний сохранили пластичность на уровне 5–7 изгибов на 180 град до разрушения. Выявлено, что на поверхности всех волокон из этих сплавов образуется тонкая оксидная пленка толщиной 2–3 мкм (рис. 6, *I* и *II*), следов отслоившейся от волокон окалины не обнаружено.

Волокна, полученные из заготовок сплава Х23Ю5, который имеет максимальную стойкость к высокотемпературному окислению среди отечественных промышленных сплавов на основе системы Fe–Cr–Al и применяется для изготовления нагревательных элементов печей с рабочей температурой до 1400°С, окислились полностью. Дополнительное легирование волокон платиной повышает их стойкость к окислению, вместе с тем в навеске присутствуют как волокна полностью окислившиеся, так и волокна только с поверхностной оксидной пленкой (рис. 6, *III*).

Методом количественного рентгеноспектрального микроанализа определен локальный состав экспериментальных образцов волокон. Установлено, что волокна из сплавов систем Ni–5Cr–15Al–2,5Pt–0,3Hf и Ni–5Cr–15Al–3Pt–2Ir–0,3Hf представляют собой

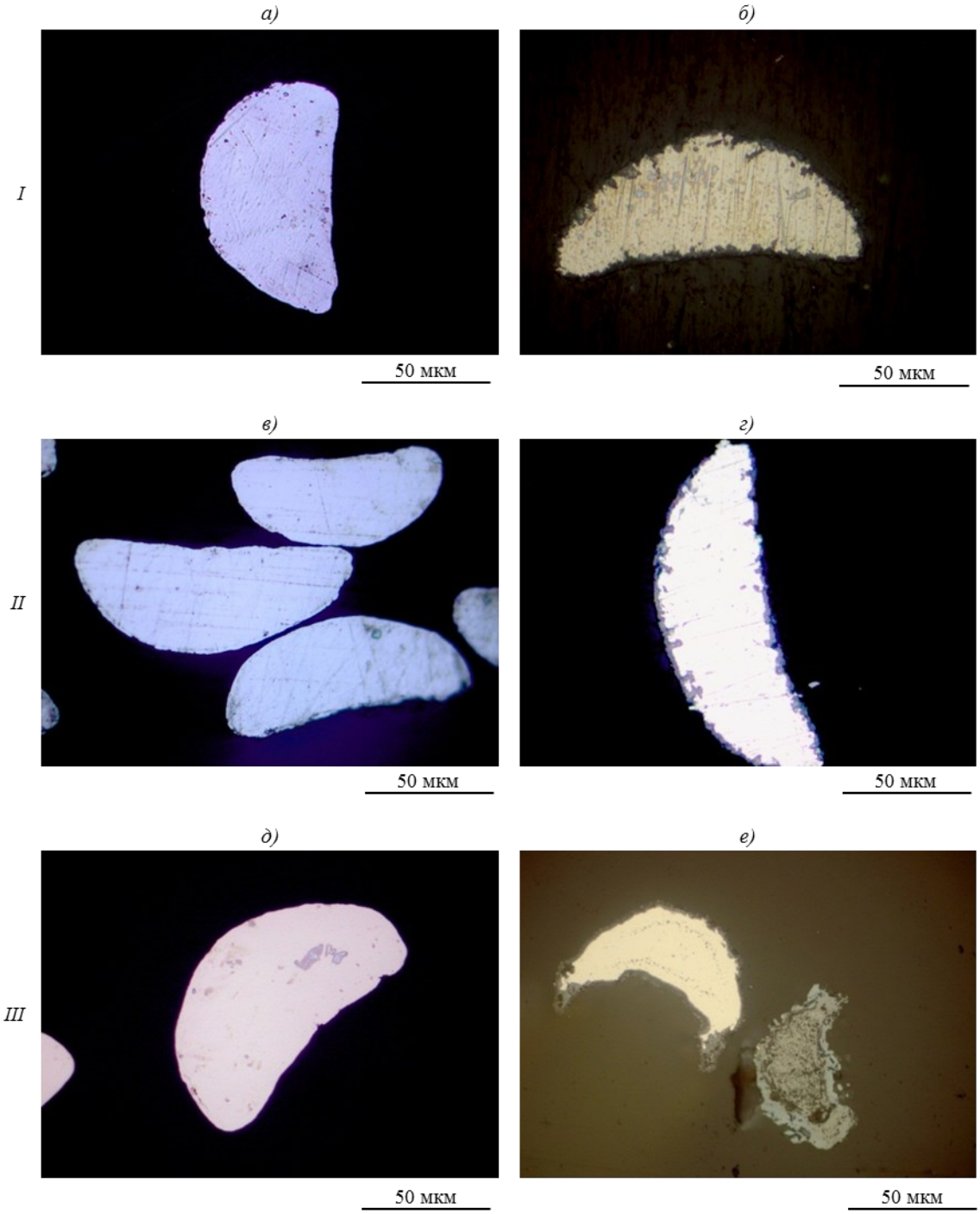

Рис. 6. Микроструктура до (*а*, *в*, *д*) и после испытаний (*б*, *г*, *е*) волокон из сплавов систем: *I* – Ni–5Cr–15Al–3Pt–2Ir–0,3Hf; *II* – Ni–5Cr–15Al–2,5Pt–0,3Hf; *III* – Fe–Cr–Al–0,5Pt

твердый раствор на основе никеля и имеют однородный состав по всему сечению волокна. Экспериментальные образцы волокон из сплава системы Fe–Cr–Al–0,5Pt состоят из твердого раствора на основе железа с хромом и имеют заметные неоднородности в составе, при этом платина содержится только в локальных зонах (фазах) в количестве до 1,2% (по массе).

Обсуждение и заключения

Проведенные исследования волокон из жаростойких сплавов, легированных металлами платиновой группы, являются промежуточными в рамках научно-исследовательской работы по разработке технологии получения волокон для истираемого уплотнительного материала с рабочей температурой до 1400°С для применения в турбинах

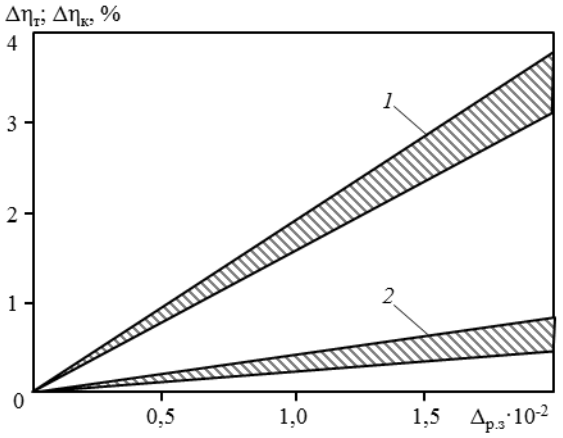

Рис. 7. Влияние относительной величины радиального зазора на снижение КПД: *1* – турбины; *2* – компрессора

перспективных ГТД. Тем не менее предварительные результаты показывают, что существует реальная возможность получения из сплавов, легированных МПГ, волокон, обладающих высокой стойкостью к окислению и пластичностью, необходимыми для изготовления пористо-волокнистого металлического материала с рабочими температурами >1000°С.

Работа по исследованию жаростойкости и технологических свойств волокон, оптимизации их состава будет продолжена. К 2017 г. планируется разработка промышленной технологии получения волокон из жаростойких сплавов, легированных МПГ, которые позволят создать истираемые уплотнительные материалы с уникальным комплексом свойств.

Несмотря на высокую стоимость платины и металлов платиновой группы, экономическая эффективность от разработки и применения истираемого уплотнительного материала из металлических волокон в турбинах современных и перспективных авиационных ГТД, достигаемая путем снижения удельного расхода топлива благодаря эффективному уменьшению величины радиальных зазоров между ротором и статором (без износа рабочих лопаток по торцам), будет ощутима.

О влиянии относительной величины радиального зазора $\Delta_{р.з}$ (отношение радиального зазора к высоте лопатки) на снижение КПД турбины ($\Delta\eta_т$) и компрессора ($\Delta\eta_к$) можно судить по зависимостям, представленным графически для одного из современных ГТД (рис. 7).

Наибольшее влияние на КПД оказывает величина радиального зазора в турбине. Так, при относительной величине радиального зазора, равной 0,02, снижение КПД турбины и компрессора составляет ~4 и ~0,65%.

Следует отметить, что для изготовления эффективных уплотнений из металлических волокон для наиболее высокотемпературных первой и второй ступеней турбины ГТД потребуется 200–300 г волокон, содержащих не более 30 г МПГ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мигунов В.П., Ломберг Б.С. Пористоволокнистые металлические материалы для звукопоглощающих и уплотнительных конструкций / В кн.: 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: Юбилейный науч.-технич. сб. М.: ВИАМ, 2007. С. 270–275.
2. Sun F.G., Chen H.L., Wu J.H., Feng K. Sound absorbing characteristics of fibrous metal materials at high temperatures // Appl. Acoust. 2010. V. 711. P. 221–235.
3. Серов М.М., Борисов Б.В. Получение металлических волокон и пористых материалов из них методом экстракции висящей капли расплава // Технология легких сплавов. 2007. №3. С. 62–65.
4. Мигунов В.П., Фарафонов Д.П. Исследование основных эксплуатационных свойств нового класса уплотнительных материалов для проточного тракта ГТД // Авиационные материалы и технологии. 2011. №3. С. 15–20.
5. Мигунов В.П., Фарафонов Д.П., Деговец М.Л., Ступина Т.И. Уплотнительные материалы для проточного тракта ГТД // Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 94–97.
6. Мигунов В.П., Фарафонов Д.П., Деговец М.Л. Истираемый уплотнительный материал на основе волокон из медных сплавов // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №9. Ст. 04. URL: http://viam-works.ru (дата обращения 12.02.2015).
7. Фарафонов Д.П., Деговец М.Л., Серов М.М. Исследование свойств и технологических параметров получения металлических волокон для истираемых уплотнительных материалов авиационных ГТД // Труды ВИАМ: электрон. науч.-технич. журн. 2014. №7. Ст. 02. URL: http://viam-works.ru (дата обращения 12.02.2015).
8. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиацион-

ные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33.
9. Fei W., Kuiry S.C., Seal S. Inhibition of Metastable Alumina Formation on Fe–Cr–Al–Y Alloy Fibers at High Temperature Using Titania Coating // Oxidation of Metals. 2004. V. 62. №1–2. P. 29–44.
10. Solntsev S.S., Rozenenkova V.A., Mironova N.A., Gavrilov S.V. SiC–Si_3N_4–SiO_2 high temperature coatings for metal fibers sealing materials // Glass and ceramics. 2011. V. 68. №5–6. P. 194–196.
11. Каблов Е.Н., Солнцев С.С., Розененкова В.А., Миронова Н.А. Современные полифункциональные высокотемпературные покрытия для никелевых сплавов, уплотнительных металлических волокнистых материалов и бериллиевых сплавов // Новости материаловедения. Наука и техника: электрон. науч.-технич. журн. 2013. №1. Ст. 05. URL: http://materialsnews.ru (дата обращения 12.02.2015).
12. Солнцев С.С., Розененкова В.А., Миронова Н.А., Гаврилов С.В. Высокотемпературные тонкопленочные покрытия для уплотнительных материалов из металлических волокон // Авиационные материалы и технологии. 2012. №1. С. 30–36.
13. Smarsly W., Zheng N., Buchheim C.S. et al. Advanced High Temperature Turbine Seals Materials and Designs // Material Science Forum. 2005. V. 492–493. P. 21–26.
14. Simms N.J., Norton J.F., McColvin G. Performance of candidate gas turbine abradeable seal materials in high temperature combustion atmospheres // Materials and Corrosion. 2005. V. 56. P. 765–777.
15. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Базылева О.А. Литейные конструкционные сплавы на основе алюминида никеля // Двигатель. 2010. №4. С. 24–25.
16. Каблов Е.Н., Бунтушкин В.П., Поварова К.Б., Базылева О.А., Морозова Г.И., Казанская Н.К. Малолегированные легкие жаропрочные высокотемпературные материалы на основе интерметаллида Ni_3Al // Металлы. 1999. №1. С. 58–65.
17. Бунтушкин В.П., Каблов Е.Н., Базылева О.А., Морозова Г.И. Сплавы на основе алюминидов никеля // МиТОМ. 1999. №1. С. 32–34.
18. Васильева Е.В., Волкова Р.М. и др. Платина, ее сплавы и композиционные материалы. М.: Металлургия, 1980. 296 с.
19. Mahaptara R.N., Varma S.K., Lei C.S. Thermal Stability and Oxidation Resistance of Pt–10Al–4Cr Alloy at Super-High Temperatures // Oxidation of Metals. 2006. V. 66. №3–4. P. 127–135.
20. Odusote J.K., Cornish L.A., Chown L.H., Erasmus R.M. Isothermal Oxidation Behaviour of a Two-Phase γ/γ′ Precipitation-Hardened Quaternary Pt-Based Alloys in Air at 1,35°C // Oxidation of Metals. 2012. V. 78. P. 123–143.
21. Felten E.J. Use of Platinum and Rhodium to Improve Oxide Adherence on Ni–8Cr–6Al Alloys // Oxidation of Metals. 1976. V. 10. №l. P. 23–28.
22. Allam I.M., Akuezue H.C., Whittle D.P. Influence of Small Pt Additions on Al_2O_3 Scale Adherence // Oxidation of Metals. 1980. V. 14. №6. P. 517–530.
23. Heidloff A.J., Tang Z., Zhang F., Gleeson B.C. A Combined Mapping Process for the Development of Platinum-modified Ni-based Superalloys // JOM. 2010. V. 62. P. 48–53.
24. Ballard D.L., Plichak A.L. The use of Precious-metal-modified Nickel-based Superalloys for Thin Gage Apllications // JOM. 2010. V. 62. P. 45–47.
25. Amano T., Takezawa Y., Shiino A., Shishido T. Surface morphology of scale on FeCrAl (Pd, Pt, Y) alloys // Journal of alloys and Compounds. 2008. V. 452. №1. P. 16–22.
26. Amano T. High-temperature oxidation of FeCrAl (Y, Pt) alloys in oxygen-water vapour // Materials at high temperatures. 2011. V. 28. №4. P. 342–348.
27. Amano T. High-temperature oxidation resistance of Al_2O_3-forming heat-resisting alloys with noble metal and rare earth additions // Materials and Corrosion. 2011. V. 62. №7. P. 659–667.