



УДК 621.775.8

DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-7-2-2

**ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ ПОЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ
ВОЛОКОН ДЛЯ ИСТИРАЕМЫХ УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ
МАТЕРИАЛОВ АВИАЦИОННЫХ ГТД**

Д.П. Фарафонов

М.Л. Деговец

М.М. Серов

Июль 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.

Д.П. Фарафонов¹, М.Л. Деговец¹, М.М. Серов²

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ПОЛУЧЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ВОЛОКОН ДЛЯ ИСТИРАЕМЫХ УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ АВИАЦИОННЫХ ГТД

С целью повышения рабочей температуры истираемых уплотнительных материалов исследованы свойства и технологические параметры получения металлических волокон методом экстракции висящей капли расплава (ЭВКР) из различных жаростойких сплавов на основе никеля, железа и интерметаллидов Ni_3Al и $NiAl$. Показана возможность создания высокоэффективных уплотнительных материалов с рабочей температурой выше $1000^{\circ}C$ для применения в проточном тракте турбин ГТД.

Ключевые слова: *истираемость, металлические волокна, жаростойкость, уплотнительный материал.*

D.P. Farafonov, M.L. Degovets, M.M. Serov

THE INVESTIGATION OF THE PROPERTIES AND TECHNOLOGICAL PARAMETERS PRODUCING METALLIC FIBERS FOR ABRADABLE SEALING MATERIALS OF AIRCRAFT GTE

In order to increase the operating temperature of abradable seal materials the properties and technological parameters for obtaining metallic fibers by method of extraction melt hanging drops from a variety of heat-resistant alloys based on nickel, iron and intermetallic compounds Ni_3Al and $NiAl$ was investigate. The possibility of creating high-effective sealing materials with operating temperatures above $1000^{\circ}C$ for use in the flow path of the turbine GTE are shown.

Keywords: *abradability, metal fibers, heat resistance, sealing material.*

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

² «МАТИ–Российский государственный технологический университет им. К.Э. Циолковского» (МАТИ) [«МАТИ–Russian State Technological University. K.E. Tsiolkovsky» (MATI)] E-mail: post@mati.ru

Одна из важнейших задач, с решением которой неизбежно сталкиваются разработчики перспективных ГТД, – обеспечение минимально допустимых радиальных зазоров между рабочими лопатками и корпусами компрессора и турбины. При утечке газа в радиальный зазор каждый процент расхода газа приводит к равному по величине (в %) уменьшению КПД ступени турбины. Согласно зарубежным исследованиям, до 5% КПД двигателя снижается за счет утечек из-за увеличенных радиальных зазоров. Однако уменьшение радиальных зазоров связано с опасностью соприкосновения торцов лопаток с деталями статора вследствие маневров самолета, перегрузок при взлете и посадке, различия температур вращающихся деталей и неподвижных частей уплотнения, скрутки ротора, деформации корпуса, вибрации и др. [1–4]. Поэтому конструкторы авиационных ГТД вынуждены предусматривать радиальные зазоры с установочными величинами до 300 мкм и более, которые увеличиваются в процессе эксплуатации в несколько раз за счет износа контактирующих поверхностей (торцов рабочих лопаток и статорных деталей).

Как показывает опыт эксплуатации двигателей, изменение зазора в уплотнениях обычно происходит в одном преимущественном направлении. Это значит, что при касаниях износ подвижных деталей приведет к увеличению зазора по всей окружности, в то время как неподвижная деталь изнашивается на небольшом участке. Поэтому отношение износа неподвижной детали к износу подвижной принято за критерий эффективности уплотнений. Явление изменения зазора в одном направлении и используется при минимизации зазора в уплотнениях проточной части ГТД. Установлено, что эффективная работа уплотнений обеспечивается при отношении линейного износа неподвижной детали к подвижной, равном 10:1 и более, но уже при соотношении 5:1 можно получить вполне удовлетворительные результаты. При этом возникает сложная материаловедческая проблема, которая заключается в выборе такой пары материалов, чтобы при взаимодействии деталей уплотнения изнашивалась в основном неподвижная деталь. С этой целью часто используются специальные (истираемые) материалы, которые наносятся на поверхность статора. Такие материалы наряду с высокой истираемостью должны обладать и рядом других физико-механических и триботехнических свойств, способных удовлетворять реальным условиям работы двигателя. Разработка уплотнительного материала, сочетающего высокую истираемость (характеризующуюся соотношением износов уплотнения и лопатки не менее 5:1) с такими характеристиками, как высокая термостойкость, эрозионная стойкость и др., является актуальной задачей авиационного материаловедения [5–7].

Наиболее широкое применение в уплотнениях турбины современных ГТД имеют металлические сотовые конструкции, работающие при температурах до 1100–1200°С. Они позволяют существенно уменьшить величину радиального зазора, но при этом ячейки сот часто прогорают и сминаются в тяжелых условиях работы турбины. Эффективность турбины с сотовым уплотнением ниже, чем с гладким уплотнением при одинаковой величине зазора, из-за возникающих дополнительных потерь газа в рабочем колесе при использовании сотовых конструкций. Гладкие материалы, применяемые главным образом для уплотнения радиальных зазоров компрессора, в основном представляют собой композиции на основе металла (Ni, Al и др.) с «мягким» наполнителем – графитом или нитридом бора, которые наносятся на статорные детали газотермическими методами. При этом даже самые «мягкие» уплотнительные материалы, такие как АНБ и НПП-75, и их зарубежные аналоги, содержащие в своих составах твердые смазки – нитрид бора и графит, не позволяют иметь нулевой зазор, так как при касании и врезании в них лопатки изнашиваются. Это связано с тем, что в требованиях к уплотнительным материалам – наряду с обеспечением отсутствия износа лопаток при врезании – есть требование по устойчивости к газоабразивному износу. В связи с этим всякая попытка сделать уплотнительный материал более «мягким» приводит к тому, что он не подходит по газоабразивной стойкости.



Рисунок 1. Образцы истираемого уплотнительного материала из металлических волокон

Из опыта применения различных видов истираемых уплотнительных материалов и по результатам проведенных в России и за рубежом исследований новых материалов для уплотнений проточного тракта ГТД очевидно, что наиболее эффективными по истираемости являются пористые металлические материалы с пористостью $>70\%$, изготовленные из тонких волокон путем их прессования и спекания (рис. 1) [8–12]. Применение металлических волокон в качестве исходного сырья для получения таких мате-

риалов обеспечивает сохранение ими необходимой прочности и эрозионной стойкости при пористости до 80–85% благодаря образованию при спекании большого числа прочных контактов между отдельными волокнами.

Основным фактором, ограничивающим применение таких материалов в качестве истираемых уплотнений в проточном тракте ГТД, является высокая рабочая температура газового потока. Диаметр волокон для получения эффективных истираемых уплотнительных материалов должен составлять не более 100 мкм, предпочтительно 15–30 мкм, поэтому максимальная температура их применения обычно составляет 800–900°С. При более высоких температурах волокна начинают интенсивно окисляться, при этом происходит сквозное окисление волокон и их разрушение, что делает невозможным применение таких материалов в турбинах, где температуры достигают 1100°С и более. Однако, учитывая то, что величина радиального зазора в турбине в наибольшей степени влияет на удельный расход топлива и КПД всего двигателя, актуальным является вопрос повышения рабочей температуры материалов из волокон.

В результате проведенных ранее в ВИАМ работ были созданы истираемые уплотнительные материалы с высокими эксплуатационными характеристиками на основе металлических волокон из сплавов систем Ni–Cr–Al, Ni–Cr–Al–Y, Fe–(Ni)–Cr–Al–Y на рабочие температуры до 700–900°С. Все эти материалы обладают низкой плотностью ($\leq 1,8 \text{ г/см}^3$), высокими пористостью и эрозионной стойкостью и очень высокой истираемостью (10:1), что обеспечивает возможность значительного уменьшения величины зазора между ротором и статором и снижение износа лопаток в 2–3 раза.

При разработке этих материалов использовались волокна, изготовленные в МАТИ методом экстракции висящей капли расплава вращающимся теплоприемником (ЭВКР). Метод ЭВКР привлекателен для получения волокон по следующим причинам:

- позволяет изготавливать как длинномерное волокно, так и дискретные частицы игольчатой формы;
- достижение сверхвысоких скоростей охлаждения (до 10^6 К/с), что приводит к образованию микрокристаллической или аморфной структуры;
- возможность применения метода при получении тугоплавких и химически активных металлов, жаростойких, коррозионностойких и труднодеформируемых сталей и сплавов благодаря бестигельной плавке;
- высокая производительность [13–16].

Для повышения рабочей температуры материалов из металлических волокон разработаны состав жаростойкого покрытия и технология его нанесения, обеспечивающая

образование тонкой защитной пленки на волокнах во всем объеме уплотнительного материала без значительного уменьшения его пористости [17–19]. Как показали проведенные исследования, применение покрытия позволяет повысить рабочую температуру уплотнения до 1100°C, но при этом истираемость материала уменьшается приблизительно в 2 раза (в среднем – до 5:1). Повышение жаростойкости уплотнительного материала без ухудшения его эксплуатационных характеристик возможно также путем использования для изготовления волокон более жаростойких сплавов, при этом необходимо учитывать следующие требования к волокнам: толщина – не более 80–100 мкм и 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.

В ВИАМ совместно с МАТИ проведены исследования возможности повышения рабочей температуры истираемых уплотнительных материалов благодаря использованию волокон из жаростойких сплавов, включающие разработку технологических параметров изготовления дискретных металлических волокон методом ЭВКР.

При выборе составов сплавов для проведения этих исследований учитывалось, что лучшей жаростойкостью обладают сплавы на основе железа и никеля, содержащие хром и алюминий в количестве не менее 2,5%. При этом в области температур >1000°C жаростойкость сплавов в основном зависит от чистоты и устойчивости образующегося на поверхности оксида Al_2O_3 . Положительное влияние на жаростойкость сплавов на основе железа и никеля может оказывать присутствие в их составе лантана, гафния или иттрия в качестве легирующих элементов.

Одними из перспективных сплавов для изготовления металлических волокон на рабочие температуры >1000°C являются сплавы на основе системы Ni–Al. Сплавы, разработанные в ВИАМ, типа ВКНА-1В, ВКНА-1ВР, ВКНА-4У и другие отличаются низкой плотностью (7,8–7,9 г/см³) и высокой жаростойкостью. Наибольшей жаростойкостью из числа таких сплавов обладает сплав ВКНА-1ВР, отличающийся содержанием в своем составе гафния до 0,6%. Жаростойкость сплава ВКНА-1ВР составляет 15 г/м² за 100 ч при 1200°C и 24,5 г/м² за 100 ч при 1250°C.

Помимо высокой жаростойкости металлические волокна для изготовления истираемого уплотнительного материала должны обладать удовлетворительной пластичностью – не охрупчиваться при прессовании заготовок и во время эксплуатации уплотнительного материала. С этой точки зрения интерес представляют сплавы на железоникелевой основе, в частности сплав ХН45Ю, имеющий относительное удлинение δ – до

50% при 20°C (значение для образцов из листов толщиной 2 мм). Из сплавов на основе интерметаллидов Ni₃Al и NiAl наибольшим значением относительного удлинения при 20°C обладает сплав ВКНА-1В: 59%, а при 1200°C – интерметаллидный сплав системы Ni–Al–Co–Re–Ti: 88% (значения для гладких цилиндрических образцов с диаметром рабочей части 5 мм) [20–23].

С учетом приведенных и других данных для получения и исследования волокон выбраны сплавы типа ВКНА-1В, ВКНА-1ВР, ВКНА-4У, ВКНА-25, сплав системы Ni–Al–Co–Re–Ti и сплав на железоникелевой основе типа ХН45Ю.

При использовании метода ЭВКР нижний торец вертикально расположенного стержня из жаростойкого сплава плавится с образованием висящей капли расплава. С каплей контактирует вершина рабочей кромки вращающегося охлаждаемого теплоприемника, которая заточена в форме равнобедренного треугольника. В зоне контакта происходит затвердевание расплава. Вследствие вращения теплоприемника затвердевший материал выносится из расплава в виде волокна и под действием центробежных сил сбрасывается с вершины рабочей кромки. В процессе работы по мере выработки расплава из объема капли стержень опускается в зону плавления и, таким образом, происходит пополнение объема капли расплава. Управляя такими параметрами процесса, как скорость вращения теплоприемника, скорость подачи расплава и мощность нагрева, можно получать волокна с эквивалентным диаметром 30–100 мкм. Волокна, полученные методом ЭВКР, имеют форму, отличающуюся от округлой. В поперечном сечении они похожи на полумесяц или чешую. При рассмотрении поперечных шлифов волокон, полученных экстракцией расплава можно выделить несколько параметров, важных для характеристики процесса и влияющих на применение волокон в изделиях. К ним можно отнести:

- S – площадь поперечного сечения;
- h – максимальную толщину волокна;
- $d_{\text{экв}}$ – эквивалентный диаметр;
- b – ширину волокна.

В таблице приведены характеристики экспериментальных образцов волокон, полученных методом ЭВКР по одному режиму, из некоторых рассматриваемых сплавов.

В результате проведенных исследований было установлено, что пластичность получаемых волокон может находиться также в зависимости от технологических параметров их получения и толщины. На рис. 2 представлена зависимость пластичности во-

локон из сплава типа ВКНА-4У, которая определялась количеством изгибов волокна на 180 град, от их толщины.

Размеры и пластичность экспериментальных образцов волокон из жаростойких сплавов

Тип сплава	$d_{\text{экв}}$	b	h	Количество изгибов на 180 град до разрушения (среднее значение)
	мкм (среднее значение)			
ВКНА-25	63,5	129,5	32,8	22
ВКНА-1В	94,26	148,8	51,54	7
ВКНА-4У	82,41	181,3	51,5	31
Ni-Al-Co-Re-Ti	56,37	129,7	32,8	0

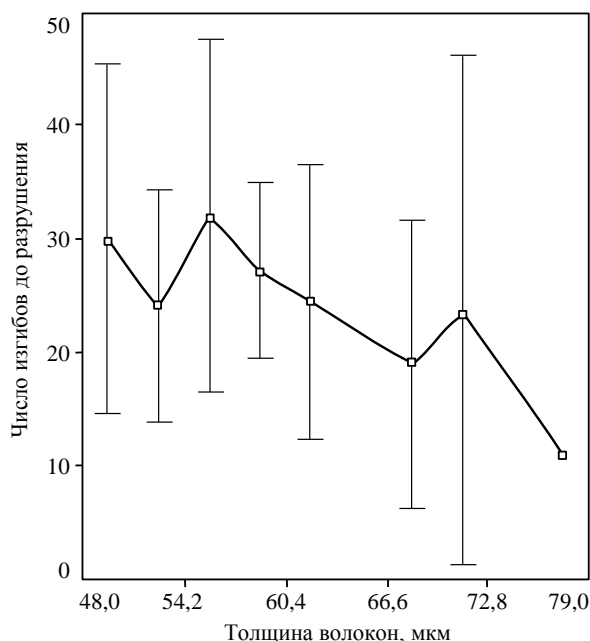


Рисунок 2. Зависимость технологической пластичности волокон (□ – среднее значение; I – доверительный интервал с вероятностью $\pm 0,95$) из сплава типа ВКНА-4У от толщины

Исследование жаростойкости полученных образцов волокон показало, что наибольшей жаростойкостью в интервале температур 1100–1300°C обладают волокна из сплава системы Ni–Al–Co–Re–Ti, но они показали нулевую пластичность. Оптимальным соотношением жаростойкости и пластичности обладают волокна из сплава типа ВКНА-4У с повышенным содержанием алюминия (рис. 3).

Низкая пластичность волокон Ni–Al–Co–Re–Ti может объясняться формированием в процессе высокоскоростного затвердевания расплава микрокристаллической (размер зерна 1–2 мкм) столбчатой структуры и образованием хрупкой метастабильной фазы Ni₃Al (рис. 4, 5, а).

Поскольку установлено, что волокна из этого сплава имеют наибольшую жаростойкость при температурах 1200–1300°C, то была исследована возможность повышения их пластичности. На основе полученных данных после проведения математическо-

го планирования эксперимента получена зависимость пластичности волокон из сплава системы Ni–Al–Co–Re–Ti от температуры нагрева, продолжительности выдержки и скорости охлаждения после изотермической выдержки и проведены дополнительные структурные исследования волокон, отожженных на воздухе при температуре <math><1000^{\circ}\text{C}</math> в течение 100 мин и в вакууме при температуре >math>>1100^{\circ}\text{C}</math> в течение 120 мин.

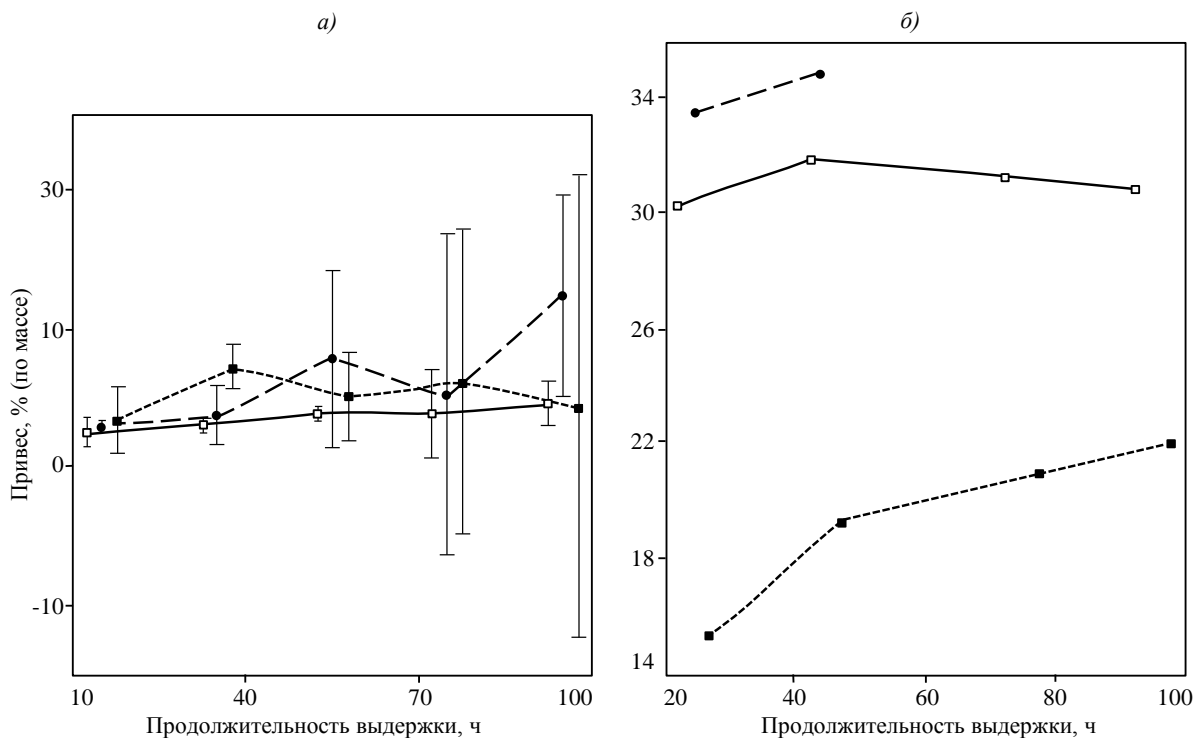


Рисунок 3. Результаты испытаний (□ – доверительный интервал с вероятностью $\pm 0,95$) волокон из сплавов типа ВКНА-4У (□), ВКНА-1В (●) и из сплава системы Ni–Al–Co–Re–Ti (■) на жаростойкость при 1100 (а) и 1200°C (б)

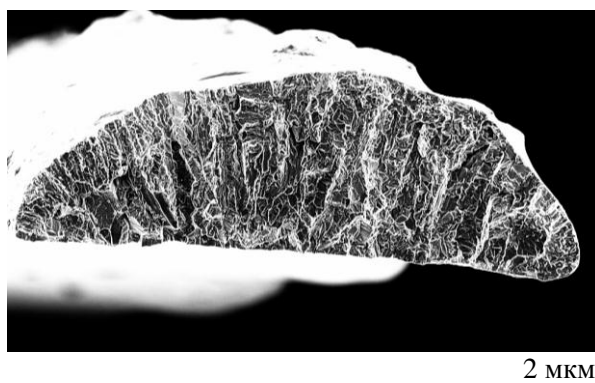


Рисунок 4. Фрактограмма поверхности излома волокна из сплава системы Ni–Al–Co–Re–Ti

Исследование структуры волокон после отжига показало, что размер зерна увеличился до 6 мкм после отжига на воздухе, а после вакуумного отжига – до 20–30 мкм (рис. 5, б). По результатам фазового анализа состав волокон из сплава системы Ni–Al–Co–Re–Ti изменился: вместо метастабильной фазы Ni_3Al и $\gamma\text{-Ni}$ -фазы сформиро-

вались стабильные фазы β -NiAl и γ' -Ni₃Al, при этом пластичность волокон заметно увеличилась*.

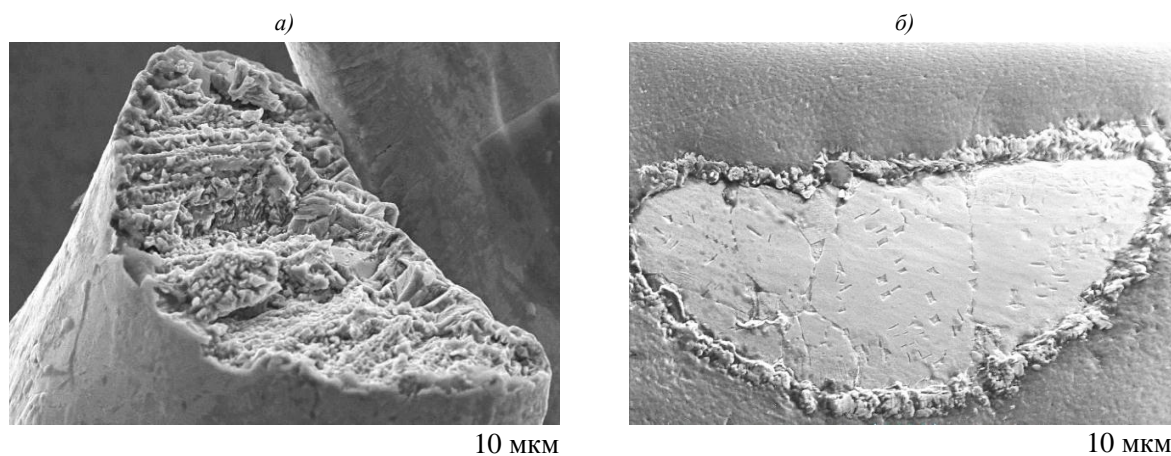


Рисунок 5. Микроструктура излома (а), полученная на растровом электронном микроскопе, структура после отжига при 1240°C (б) волокна из сплава системы Ni–Al–Co–Re–Ti

Для отожженных волокон была получена зависимость пластичности от толщины волокна (рис. 6). На всех трех графиках зависимости технологической пластичности от диаметра видно, что с уменьшением диаметра возрастает и технологическая пластичность. Волокна, полученные методом ЭВКР из сплава системы Ni–Al–Co–Re–Ti, не обладают достаточной технологической пластичностью. Волокна, отожженные на воздухе при температуре <1000°C в течение 100 мин, имеют достаточную пластичность при диаметре <60 мкм. Количество таких волокон в партии 41%. В то время как волокна, отожженные в вакууме при более высоких температурах в течение 100 мин, имеют удовлетворительную технологическую пластичность при диаметре <80 мкм, а таких волокон в партии 90%.

На волокне из сплава системы Ni–Al–Co–Re–Ti после испытаний на жаростойкость при 1100°C длительностью 100 ч проведен микрозондовый рентгеноспектральный анализ (МРСА) излома (рис. 7), который показал, что оксидный слой на поверхности волокон имеет слоистое строение. Внешний слой представлен оксидом алюминия, а между ним и металлом находится промежуточный слой состава Al₅₀Ni₃₂O₁₈ (% атомн.). По результатам МРСА обнаружен факт уменьшения содержания алюминия в составе сплава с увеличением продолжительности выдержки при испытаниях на жаростойкость. Аналогичные результаты получены при исследовании волокон из сплава типа ВКНА-4У.

* Работы по рентгеновскому фазовому анализу выполнены на кафедре МИТОМ МАТИ под руководством профессора С.Я. Бецофена.

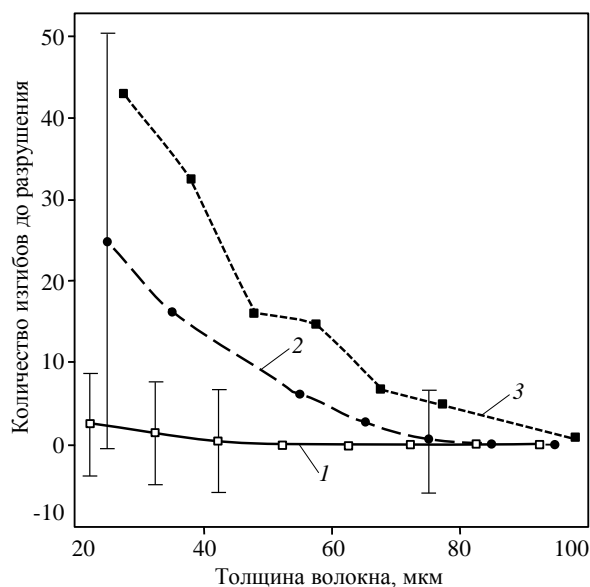


Рис. 6. Зависимость пластичности (\pm доверительный интервал с вероятностью $\pm 0,95$) волокон сплава системы Ni–Al–Co–Re–Ti от толщины (в исходном состоянии) после изготовления (1) и после отжига на воздухе (2) и в вакууме (3)

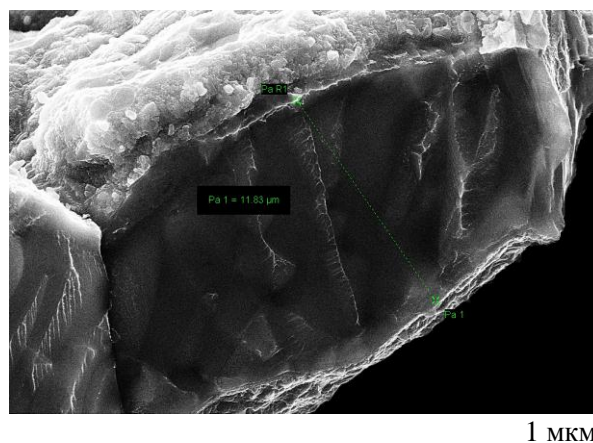


Рис. 7. Излом волокон из сплава Ni–Al–Co–Re–Ti после испытаний на жаростойкость при 1100°C в течение 100 ч

Таким образом, проведенными исследованиями установлена зависимость пластичности дискретных металлических волокон от их толщины и технологических параметров их изготовления. Показано, что повышение рабочей температуры истираемого уплотнительного материала из металлических волокон возможно не только путем применения защитных жаростойких покрытий, влияющих на истираемость этих материалов, но также за счет поиска новых сплавов для изготовления методом ЭВКР жаростойких волокон с требуемой пластичностью. Из волокон сплавов типа ВКНА-4У и системы Ni–Al–Co–Re–Ti были изготовлены экспериментальные образцы уплотнительного материала с пористостью $>60\%$, исследования которых подтвердили, что применение этих волокон обеспечивает возможность создания высокоэффективного уплотнительного материала с рабочей температурой $>900^\circ\text{C}$ [24]. При использовании защитных покрытий на поверхности отожженных в вакууме волокон из сплава системы Ni–Al–Co–Re–Ti рабочая температура может достигать 1300°C , что делает возможным применение таких уплотнений в перспективных авиационных ГТД и способствует выполнению основных задач развития двигателестроения в России – повышение экономичности двигателей гражданской авиации на 10–15%, создание конкурентоспособной авиационной техники с улучшенными летно-техническими характеристиками [25].

ЛИТЕРАТУРА

1. Мигунов В.П. Материалы для уплотнений проточной части ГТД /В сб.: Вопросы авиационной науки и техники. Сер. Авиационные материалы. Вып. Уплотнительные материалы для проточной части ГТД. М.: ВИАМ. 1993. С. 5–8.
2. Кузнецов Е.Г., Майлер Д.П., Почуев В.П. Применение истираемых уплотнений в проточной части ГТД /В сб.: Вопросы авиационной науки и техники. Сер. Авиационные материалы. Вып. Уплотнительные материалы для проточной части ГТД. М.: ВИАМ. 1993. С. 8–13.
3. Еган О.М., Сапронов Т.Г., Максимова Р.З., Мокина Г.П., Качановская Л.Т. Методики исследований материалов для уплотнений проточного тракта /В сб.: Вопросы авиационной науки и техники. Сер. Авиационные материалы. Вып. Уплотнительные материалы для проточной части ГТД. М.: ВИАМ. 1993. С. 17–21.
4. Иноземцев А.А., Сандрацкий В.Л. Газотурбинные двигатели. Пермь: ОАО «Авиадвигатель». 2006. С. 278–280.
5. Мигунов В.П. Уплотнительные материалы /В сб. Авиационные материалы на рубеже XX–XXI веков. М.: ВИАМ. 1994. С. 344–346.
6. Мигунов В.П., Ломберг Б.С. Пористоволокнистые металлические материалы для звукопоглощающих и уплотнительных конструкций /В сб.: 75 лет. Авиационные материалы. Избранные труды «ВИАМ» 1932–2007: Юбилейный науч.-технич. сб. М.: ВИАМ. 2007. С. 270–275.
7. Мигунов В.П., Фарафонов Д.П., Деговец М.Л., Ступина Т.И. Уплотнительные материалы для проточного тракта ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 94–97.
8. 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.
9. Sporer D., Wilson S., Giovannetti I., Refke A., Giannozzi M. On the potential of metal and ceramic based abradables in turbine seal applications /Proceedings of the thirty-sixth turbomachinery symposium. Texas A & M University. 2007. P. 79–86.
10. Potter D.J., Chai Y.W., Tatlock G.J. Improvements in honeycomb abradable seals //Materials at High Temperatures. 2009. V. 26. №2. P. 127–135.
11. Zheng N.X., Däubler M.A., Schweitzer K.K., Hensle W., Schlegel H. Development of air seal system for modern jet engines. Munich: MTU Aero Engines GmbH. 2003.

12. Sporer D., Wilson S., Dorfman M. Ceramics for abradable shroud seal applications //Advanced ceramic coatings and interfaces. 2009. V. 30. №4. P. 39–53.
13. 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.
14. Серов М.М. Микроструктурные и аморфные сплавы, полученные методом высокоскоростного затвердевания расплава //Технология легких сплавов. 2008. №4. С. 34–40.
15. Борисов Б.В., Серов М.М. Формирование пористых волоконных материалов методом экстракции висящей капли расплава //Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2013. №1. С. 55–58.
16. Анциферов В.Н., Серов М.М., Лежнин В.П., Сметкин А.А. О получении, свойствах и применении быстроохлажденных //Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия. 2011. №4. С. 36–40.
17. 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.
18. Солнцев С.С., Розененкова В.А., Миронова Н.А., Гаврилов С.В. Высокотемпературные покрытия $\text{SiC-Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$ для уплотнительных материалов из металлических волокон //Стекло и керамика. 2011. №6. С. 27–30.
19. Solntsev S.S., Rozenenkova V.A., Mironova N.A., GavriloV S.V. $\text{SiC-Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$ high-temperature coatings for metal fiber sealing materials //Glass and Ceramics. 2011. V. 68. №5–6. P. 194–195.
20. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Туренко Е.Ю. Высокотемпературные интерметаллидные сплавы для деталей ГТД //Авиационные материалы и технологии. 2013. №3. С. 26–31.
21. Базылева О.А., Аргинбаева Э.Г., Туренко Е.Ю. Жаропрочные литейные интерметаллидные сплавы //Авиационные материалы и технологии. 2012. №S. С. 57–60.
22. Сплав на основе интерметаллида Ni_3Al : пат. 2434067 Рос. Федерация; опубл. 01.07.2010.
23. Сплав на основе интерметаллида Ni_3Al : пат. 2434068 Рос. Федерация; опубл. 05.10.2010.
24. Способ получения пористого истираемого материала из металлических волокон: пат. 2382828 Рос. Федерация; опубл. 28.04.2008.

25. 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.

REFERENCES LIST

1. Migunov V.P. Materialy dlja uplotnenij protochnoj chasti GTD [Sealants flowing part of GTE] /V sb.: Voprosy aviacionnoj nauki i tehniki. Ser. Aviacionnye materialy. Vyp. Uplotnitel'nye materialy dlja protochnoj chasti GTD. M.: VIAM. 1993. S. 5–8.
2. Kuznecov E.G., Majler D.P., Pochuev V.P. Primenenie istiraemyh uplotnenij v protochnoj chasti GTD [Application abrasable seals in the running part of GTE] /V sb.: Voprosy aviacionnoj nauki i tehniki. Ser. Aviacionnye materialy. Vyp. Uplotnitel'nye materialy dlja protochnoj chasti GTD. M.: VIAM. 1993. S. 8–13.
3. Egan O.M., Saprionov T.G., Maksimova R.Z., Mokina G.P., Kachanovskaja L.T. Metodiki issledovanij materialov dlja uplotnenij protochnogo trakta [Research methodology materials for sealing the flow path] /V sb.: Voprosy aviacionnoj nauki i tehniki. Ser. Aviacionnye materialy. Vyp. Uplotnitel'nye materialy dlja protochnoj chasti GTD. M.: VIAM. 1993. S. 17–21.
4. Inozemcev A.A., Sandrackij V.L. Gazoturbinnye dvigateli [Gas turbine engines]. Perm': OAO «Aviadvigatel'». 2006. S. 278–280.
5. Migunov V.P. Uplotnitel'nye materialy [Sealants] /V sb. Aviacionnye materialy na rubezhe HH–HHI vekov. M.: VIAM. 1994. S. 344–346.
6. Migunov V.P., Lomberg B.S. Poristovoloknistye metallicheskie materialy dlja zvukopogloshhajushhih i uplotnitel'nyh konstrukcij [Porous and fibrous metallic materials for sound and sealing structures] /V sb.: 75 let. Aviacionnye materialy. Izbrannye trudy «VIAM» 1932–2007: Jubilejnyj nauch.-tehnič. sb. M.: VIAM. 2007. S. 270–275.
7. Migunov V.P., Farafonov D.P., Degovec M.L., Stupina T.I. Uplotnitel'nye materialy dlja protochnogo trakta GTD [Sealing materials for the flow path GTE] //Авиационные материалы и технологии. 2012. №5. С. 94–97.
8. Migunov V.P., Farafonov D.P. Issledovanie osnovnyh jekspluatacionnyh svojstv novogo klassa uplotnitel'nyh materialov dlja protochnogo trakta GTD [Investigation of the basic operational properties of a new class of materials for sealing the flow path GTE] //Авиационные материалы и технологии. 2011. №3. С. 15–20.

9. Sporer D., Wilson S., Giovannetti I., Refke A., Giannozzi M. On the potential of metal and ceramic based abrasives in turbine seal applications //Proceedings of the thirty-sixth tur-bomachinery symposium. Texas A & M University. 2007. P. 79–86.
10. Potter D.J., Chai Y.W., Tatlock G.J. Improvements in honeycomb abrasible seals //Materials at High Temperatures. 2009. V. 26. №2. P. 127–135.
11. Zheng N.X., Däubler M.A., Schweitzer K.K., Hensle W., Schlegel H. Development of air seal system for modern jet engines. Munich: MTU Aero Engines GmbH. 2003.
12. Sporer D., Wilson S., Dorfman M. Ceramics for abrasible shroud seal applications //Advanced ceramic coatings and interfaces. 2009. V. 30. №4. P. 39–53.
13. Serov M.M., Borisov B.V. Poluchenie metallicheskih volokon i poristykh materia-lov iz nih metodom jekstrakcii visjashhej kapli rasplava [Preparation of metallic fibers and porous material of which the hanging drop method of extraction of the melt] //Tehnologija legkih splavov. 2007. №3. S. 62–65.
14. Serov M.M. Mikrokristallicheskie i amorfnye splavy, poluchennye metodom vysokorostnogo zatverdevaniya rasplava [Microcrystalline and amorphous alloys obtained by high-speed melt solidification] //Tehnologija legkih splavov. 2008. №4. S. 34–40.
15. Borisov B.V., Serov M.M. Formirovanie poristykh voloknovykh materialov metodom jekstrakcii visjashhej kapli rasplava [Formation of porous materials by extraction of fiber hanging melt drops] //Izvestija vuzov. Poroshkovaja metallurgija i funkcional'nye pokrytija. 2013. №1. S. 55–58.
16. Anciferov V.N., Serov M.M., Lezhnin V.P., Smetkin A.A. O poluchenii, svojstvah i primenenii bystroohlazhdennykh volokon волокон [On receipt, properties and applications of rapidly cooled fibers] //Izvestija vuzov. Poroshkovaja metallurgija i funkcional'nye pokrytija. 2011. №4. S. 36–40.
17. Solncev S.S., Rozenenkova V.A., Mironova N.A., Gavrilov S.V. Vysokotemperaturnye tonkoplenochnye pokrytija dlja uplotnitel'nykh materialov iz metallicheskih volokon [High-temperature thin-film coatings for sealing materials of metal fibers] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №1. S. 30–36.
18. Solncev S.S., Rozenenkova V.A., Mironova N.A., Gavrilov S.V. Vysokotemperaturnye pokrytija $\text{SiC-Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$ dlja uplotnitel'nykh materialov iz metallicheskih volokon [High temperature coating $\text{SiC-Si}_3\text{N}_4\text{-SiO}_2$ for sealing materials of metal fibers] //Steklo i keramika. 2011. №6. S. 27–30.

19. Solntsev S.S., Rozenenkova V.A., Mironova N.A., Gavrilov S.V. SiC–Si₃N₄–SiO₂ high-temperature coatings for metal fiber sealing materials //Glass and Ceramics. 2011. V. 68. №5–6. P. 194–195.
20. Bazyleva O.A., Arginbaeva Je.G., Turenko E.Ju. Vysokotemperaturnye intermetallidnye splavy dlja detalej GTD [High-temperature intermetallic alloys for GTE parts] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2013. №3. S. 26–31.
21. Bazyleva O.A., Arginbaeva Je.G., Turenko E.Ju. Zharoprochnye litejnye intermetallidnye splavy [Heat-resistant casting intermetallic alloys] //Aviacionnye materialy i tehnologii. 2012. №S. S. 57–60.
22. Splav na osnove intermetallida Ni₃Al [Alloy based on Ni₃Al intermetallic]: pat. 2434067 Ros. Federacija; opubl. 01.07.2010.
23. Splav na osnove intermetallida Ni₃Al [Alloy based on Ni₃Al intermetallic]: pat. 2434068 Ros. Federacija; opubl. 05.10.2010.
24. Sposob poluchenija poristogo istiraemogo materiala iz metallicheskih volokon [A method for producing a porous abrasible material of metal fibers]: pat. 2382828 Ros.Federacija; opubl. 28.04.2008.
25. 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. №S. S. 7–17.