

1. Николас А., Рольник С. Применение магниевых компонентов в аэрокосмической промышленности //Аэрокосмический курьер. 2011. №1. С. 42–44.
2. Волкова Е.Ф. Современные деформируемые сплавы и композиционные материалы на основе магния //МиТОМ. 2006. №11. С. 5–9.
3. Волкова Е.Ф., Морозова Г.И. Влияние цирконидов цинка на механические и технологические характеристики магниевых сплавов //Технология легких сплавов. 2004. №5. С. 20–24.
4. Лашко Н.Ф., Заславская Л.В., Козлова М.Н. и др. Физико-химический фазовый анализ сталей и сплавов.– М.: Металлургия. 1978. 336 с.
5. Сокольская Л.Н. Газы в легких металлах.– М.: Металлургиздат. 1969. 115 с.
6. Волкова Е.Ф., Морозова Г.И. Роль водорода в деформируемых магниевых сплавах системы Mg–Zn–Zr–PЗМ //МиТОМ. 2008. №3. С. 13–17.
7. Морозова Г.И., Лашко Н.Ф., Назарова М.П. и др. Анализ интерметаллидных включений в дефектных отливках из сплавов системы Mg–Zn–Zr //Технология легких сплавов. 1976. №9. С. 13–17.

УДК 621.792.8

В.П. Мигунов, Д.П. Фарафонов

ИССЛЕДОВАНИЕ ОСНОВНЫХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ СВОЙСТВ НОВОГО КЛАССА УПЛОТНИТЕЛЬНЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПРОТОЧНОГО ТРАКТА ГТД

Разработаны принципиально новые истираемые уплотнительные материалы на основе дискретных металлических волокон для компрессора и турбины ГТД на рабочие температуры до 1100°С. Проведены лабораторные исследования основных эксплуатационных свойств разработанных материалов. По уровню эксплуатационных свойств материалы не имеют аналогов. Благодаря высокой истираемости их применение позволит уменьшить величину радиальных зазоров в проточном тракте ГТД для предотвращения утечек рабочего газа и значительно уменьшить износ лопаток по торцам при их соприкосновении и врезании в уплотнительные материалы.

Ключевые слова: *истираемые уплотнительные материалы, металлические волокна, свойства, истираемость.*

Одним из способов снижения удельного расхода топлива и повышения КПД силовых установок ГТД является предотвращение утечек рабочего газа через радиальные зазоры между торцами лопаток и статорными деталями турбин и компрессоров ГТД за счет уменьшения величины радиальных зазоров. Однако это связано с опасностью соприкосновения лопаток с деталями статора вследствие деформации корпуса и ротора при маневрах самолета и работе ГТД на нестационарных режимах, при вибрации и в ряде других случаев, что может привести к износу лопаток и даже к поломке контактирующих деталей.

Решить эту проблему можно путем разработки и применения специальных уплотнительных материалов, обладающих способностью «истираться» при взаимодействии с вращающимися лопатками, не изнашивая торцы лопаток. 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.

Наиболее широкое применение для уплотнений турбины современных ГТД имеют металлические сотовые конструкции, работающие при температурах до 1100–1200°C. Такие конструкции 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 [1]. 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. Это такие материалы, как АНБ, АГ-10, 20Б, КНА, УВС-П, НПГ-75, УП-34 и др. Общий недостаток этих материалов – плохая истираемость, связанная, в первую очередь, с недостаточным содержанием в них «мягких» наполнителей. Даже самые «мягкие» уплотнительные материалы АНБ и НПГ-75 и их зарубежные аналоги (покрытия фирмы «Sulzer Metco»), 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 газообразивному износу. В связи с этим всякая попытка сделать уплотнительный материал более «мягким» приводит к тому, что он не обладает достаточной газообразивной стойкостью.

Одним из направлений по разработке истираемых материалов – как за рубежом, так и в нашей стране – является поиск возможности повышения содержания «мягких» наполнителей в составе покрытий, получаемых методами газотермического нанесения. Так, используя для нанесения покрытий порошок графита, плакированного никелем с помощью метода автоклавно-водородного восстановления, плазменным методом можно изготовить уплотнительный материал, содержащий до 50% (объемн.) равномерно распределенной твердой смазки, которая обеспечивает требуемую истираемость покрытия. Метод вакуумно-компрессионной пропитки твердой смазки (например нитрида бора) жидким металлом дает реальную возможность довести твердую смазку в покрытии до 50% (объемн.) и более при идеальной структуре распределения компонентов. Такие покрытия отлично работают при температурах до 700°C.

В ВИАМ проведены работы по уменьшению недостатков металлических сотовых уплотнений путем заполнения ячеек сот различными композициями материалов. Опробование в производственных условиях двигателей с уплотнениями турбины в виде сот, заполненных наполнителем, показало реальную возможность повышения КПД двигателя и снижения удельного расхода топлива на 1% [1].

Еще одно не менее перспективное направление разработки истираемых уплотнений – изготовление высокопористых материалов без твердых смазок. Попытка создать высокопористые материалы из порошков не удалась, так как при получении требуемой пористости сохранить прочность материала не представляется возможным. Кроме того, такие материалы имеют низкую пластичность, которая с увеличением пористости падает.

Известные зарубежные покрытия для уплотнения радиального зазора турбины на основе оксида циркония, такие как RT-180 (фирма «Chromalloy»), имеют максимальную по-

ристость ~20%, что недостаточно для устранения износа лопаток. При повышении значения пористости такие покрытия теряют необходимую газоабразивную стойкость.

В связи с этим вызывают интерес высокопористые материалы из металлических волокон. К их достоинствам следует отнести высокую механическую прочность, пластичность и газоабразивную стойкость даже при большой пористости.

За рубежом проводились работы по созданию уплотнительных материалов из металлических волокон. При этом использовались волокна из одного металла (например Ni). Температура эксплуатации таких материалов ограничена 500–600°C. Другой известный способ получения высокопористого металлического материала заключается в изготовлении углеродных волокон, их плакировке никелем, формировании листа, его обезуглероживании и спекании с последующим алитированием или хромированием из газовой фазы, что позволяет поднять рабочую температуру уплотнительного материала до 600–750°C, однако при этом теряется преимущество пористого материала, так как он становится жестким.

В последние годы в ВИАМ проводятся исследования по разработке высокопористых истираемых материалов на основе дискретных волокон из жаростойких сплавов. Такая возможность появилась в связи с разработкой в МГТУ им. К.Э. Циолковского высокопроизводительной технологии изготовления волокон методом экстракции висящей капли расплава вращающимся диском, позволяющей получать дискретные волокна диаметром 15–30 мкм из жаростойких сплавов, обладающие необходимыми для изготовления высокопористого истираемого уплотнительного материала формуемостью и пластичностью.

С помощью этого метода были изготовлены опытные партии дискретных волокон сплавов систем Ni–Cr–Al, Ni–Cr–Al–Y, Fe–(Ni)–Cr–Al–Y, которые позволили создать принципиально новые уплотнительные материалы с низкой плотностью ($\leq 1,8 \text{ г/см}^3$ при пористости до 80%) на рабочие температуры компрессора и турбины от 700 до 900°C (рис. 1) [2].



Рис. 1. Металлические волокна и образцы уплотнительного материала:
а – дискретные металлические волокна, полученные методом экстракции висящей капли расплава; *б* – образцы истираемого уплотнительного материала из металлических волокон

Технологическая схема изготовления истираемых материалов из металлических дискретных волокон заключается в укладке волокон в стальных пресс-формах с использованием вибрационного воздействия на пресс-форму, прессовании на гидропрессе и спекании в вакуумных печах.

Для повышения рабочей температуры истираемого материала на основе волокон сплава системы Fe–(Ni)–Cr–Al–Y до 1100°C (что соответствует условиям работы уплотнения первой ступени ТВД современных двигателей) разработано жаростойкое керамическое покрытие системы SiC–SiO₂ и технология его нанесения, позволяющая защищать поверхность волокон во всем объеме материала. Применение защитного керамического покрытия позволило повысить жаростойкость уплотнительного материала без значительного увеличения его плотности ($\leq 2,2$ г/см³).

При разработке и исследовании уплотнительных материалов из волокон основное внимание обращалось на уровень их жаростойкости, термостойкости, истираемости и эрозионной или газоабразивной стойкости. Оценка этих свойств проводили в соответствии с разработанной в институте методикой.



Рис. 2. Образец уплотнительного материала из металлических волокон после испытания на врезание

Методика испытаний на истираемость (врезание) основана на измерении износа при контактном взаимодействии образца уплотнительного материала (рис. 2) и вращающегося образца (имитатора лопатки) при их сближении на заданную величину с заданной скоростью. Результаты испытаний на врезание показали, что материал на основе дискретных металлических волокон с рабочими температурами до 900°C обладает очень высокой истираемостью (10:1), превышающей истираемость серийных материалов в 3–5 раз, при этом не происходит выкрашивания и наволакивания уплотнительного материала на имитатор лопатки при их контактном взаимодействии.

Метод определения эрозионной стойкости основан на измерении потери массы исследуемого материала при обдувании его скоростным потоком воздуха с взвешенными твердыми абразивными частицами. Газоабразивная стойкость определяется как отношение объема истраченного абразива к объему унесенного им испытываемого материала:

$$\beta = \frac{V_a \cdot \gamma_m}{\Delta m},$$

где V_a – объем истраченного абразива, см³; γ_m – плотность испытываемого материала, г/см³; Δm – потеря массы испытываемого образца, г.

Значение величины газоабразивной стойкости для истираемого материала на основе металлических волокон, вычисляемой по приведенной формуле, составляет 500 ед., что превышает значения для серийных уплотнительных покрытий, наносимых газопламенным или плазменным напылением.

Испытания уплотнительных материалов на жаростойкость и термостойкость определяют возможность их использования при максимальных значениях рабочей температуры.

Характерной особенностью уплотнительных материалов проточного тракта ГТД является их сильно развитая поверхность вследствие высокой пористости. Площадь поверхности данных материалов количественному определению практически не поддается. Поэтому существующие методы оценки жаростойкости к этим материалам не применимы.

Методика определения жаростойкости уплотнительного материала основана на определении относительного изменения массы образца при воздействии на него температуры в течение определенного промежутка времени в воздушной среде.

Метод определения термостойкости заключается в определении количества рабочих теплосмен, приводящих материал к разрушению. Под рабочей теплосменой подразумевается цикл нагрева материала до заданной температуры с последующим охлаждением до температуры окружающей среды.

Результаты испытаний истираемых материалов на жаростойкость и термостойкость показали, что материалы на основе волокон сплава системы Ni–Cr–Al могут применяться в компрессорах и турбинах ГТД при рабочих температурах до 700°C, на основе сплава системы Ni–Cr–Al–Y – до 800°C, на основе Fe–(Ni)–Cr–Al–Y – до 900°C.

Применение защитного керамического покрытия позволило повысить жаростойкость уплотнительного материала, но отрицательно повлияло на его истираемость – отношение износов изменилось до (3–5):1. Тем не менее уплотнительный материал на основе волокон Fe–(Ni)–Cr–Al–Y с жаростойким покрытием превосходит по истираемости большинство известных материалов и находится на уровне лучших по данному показателю применяемых в серийном производстве уплотнений (АНБ, УВС-2П), превосходя их по уровню эрозионной стойкости и максимальной рабочей температуре.

Основные эксплуатационные свойства истираемых уплотнительных материалов на основе дискретных металлических волокон приведены в таблице.

Свойства уплотнительных материалов на основе металлических волокон

Свойства	Значения свойств для материалов системы			
	Ni–Cr–Al	Ni–Cr–Al–Y	Fe–(Ni)–Cr–Al–Y	Fe–(Ni)–Cr–Al–Y + + SiC–SiO ₂
Рабочая температура $T_{\text{раб}}$, °C	700	800	900	1100
Плотность, г/см ³	≤1,8			≤2,2
Пористость, %	≥70			
Жаростойкость (привес) после 100 ч при $T_{\text{раб}}$, %	≤0,4	≤0,5	≤0,7	≤1,5
Эрозионная стойкость, ед.	≥500			
Термостойкость – число циклов при испытании по режиму $T_{\text{раб}} \pm 20^\circ\text{C}$ без видимых разрушений образца	Не менее 100			
Твердость НВ	≤5			
Истираемость – отношение износов уплотнительного материала и образца-имитатора лопатки	Не менее 10:1			(3–5):1

Нанесение уплотнительных материалов из металлических волокон на статорные детали ГТД возможно методом высокотемпературной вакуумной пайки.

По уровню приведенных эксплуатационных свойств разработанные материалы не имеют аналогов. Их применение в проточной части турбины и компрессорах ГТД позволит: увеличить срок службы дорогостоящих лопаток и уплотнительных узлов в 2–3 раза благодаря высокой истираемости уплотнительного материала; снизить массу уплотнительного материала турбины в 2–3 раза за счет уменьшения его плотности по сравнению с металлическими вставками, применяемыми в отечественных двигателях в настоящее время. Высокая истираемость разработанных материалов позволит минимизировать радиальные зазоры, обеспечив экономию топлива путем повышения КПД тур-

бины и компрессора до 1–1,5%, при этом исключается риск поломки деталей уплотнительных узлов при их контактном взаимодействии.

Для полного представления о свойствах принципиально новых истираемых материалов и эффективности их применения необходимо проводить испытания в реальных условиях на технологическом двигателе. Такие испытания готовятся.

ЛИТЕРАТУРА

1. Мигунов В.П. Материалы для уплотнений проточной части ГТД // Вопросы авиационной науки и техники. Авиационные материалы. Вып. Уплотнительные материалы для проточной части ГТД. М.: ВИАМ. 1993. С. 5–8.
2. 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. М.: ВИАМ. 2007. С. 270–275.

УДК 678.027.7:678.8

М.И. Душин, А.В. Хрульков, Р.Р. Мухаметов

ВЫБОР ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АВТОКЛАВНОГО ФОРМОВАНИЯ ДЕТАЛЕЙ ИЗ ПОЛИМЕРНЫХ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Представлены результаты исследования процесса удаления излишков связующего из образцов с разным количеством слоев препрега при вакуумно-автоклавном формовании стеклопластиков, приведены данные изменения толщины наполнителя и его проницаемости в зависимости от величины приложенного давления формования, даны рекомендации по режиму формования толстостенных образцов.

Ключевые слова: автоклавное формование, содержание связующего, проницаемость, давление, продолжительность.

Приступая к автоклавному формованию деталей из полимерных композиционных материалов, необходимо правильно выбрать параметры режима формования (вакуум, температура, давление, продолжительность их воздействия) для получения качественного материала, отвечающего заданным требованиям по соотношению «армирующий наполнитель–связующее» и имеющего наименьшую пористость. Предполагается, что к моменту завершения процесса отверждения должен быть полностью удален избыток связующего из каждого слоя препрега и максимально удалены летучие продукты, к которым относятся остатки растворителя в связующем и парогазовые включения, оставшиеся в армирующем наполнителе в процессе получения препрега.

В настоящее время режим отверждения выбирается в основном опытным путем по результатам отверждения небольших образцов и на основе оценки свойств этих образцов. Для тонкостенных конструкций такой подход приемлем, так как при их формировании успевают удалиться как летучие продукты, так и излишки связующего. Однако это не всегда может быть приемлемо для толстостенных изделий, поскольку большая толщина и малая жизнеспособность связующего при повышенной температуре могут привести к удалению излишков связующего только из части слоев препрега. Во избежание этого необходимо провести предварительный расчет давления формования и продолжительности процесса удаления излишков связующего из всех слоев пакета препрега. В этом случае необходимо