

*В.П. МИГУНОВ, Д.П. ФАРАФОНОВ,
М.Л. ДЕГОВЕЦ, Т.И. СТУПИНА*

УПЛОТНИТЕЛЬНЫЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПРОТОЧНОГО ТРАКТА ГТД

Повышение КПД газотурбинного двигателя во многом зависит от величины радиального зазора в проточной части турбины – между торцами лопаток и корпусом (так называемой контактной пары), и сохранения его на заданном уровне в течение всего ресурса. Это может быть достигнуто путем разработки эффективной системы уплотнения при условии, что корпус турбины и компрессора высокого давления будет оснащен эффективным истираемым материалом, а торцы лопаток упрочнены абразивно-износостойким материалом.

В 2007 г. была начата комплексная научно-исследовательская работа по разработке принципиально новых композиционных материалов контактной пары на рабочие температуры 1100°C и выше. Необходимо было повысить ресурс рабочих лопаток турбины не менее чем в 3 раза, а за счет снижения радиального зазора в проточной части турбины увеличить КПД турбины не менее чем на 1%. Ранее работами, проведенными в ВИАМ, было показано, что наиболее эффективными материалами в качестве истираемых элементов контактной пары «корпус ТВД–торец лопатки» являются истираемые уплотнительные материалы нового класса на основе дискретных металлических волокон (рис. 1).

Совместно с МАТИ им. К.Э. Циолковского была проведена работа по получению дискретных волокон диаметром 10–30 мкм и длиной 5 мм из жаростойких сплавов методом экстракции висящей капли расплава (ЭВКР), обладающих достаточной пластичностью (изгиб на 180 град – не менее 5 раз) и жаростойкостью. За рубежом волокна для этих целей получали методом гальванического осаждения никеля или меди. При температуре выше 600–700°C они теряют работоспособность. В результате в качестве материала волокон выбран сплав системы Fe–Cr–Al–Y с рабочей температурой до 900°C. Для повышения рабочей температуры волокон выбран состав жаростойкого покрытия SiC–SiO₂, позволяющего защитить поверхность волокон во всем объеме материала и повысить его рабочую температуру до 1100°C. Основные характеристики истираемого уплотнительного материала на основе волокон приведены в табл. 1.



Рис. 1. Микроструктура уплотнительного материала из дискретных металлических волокон

Создание эффективного, технологичного, хорошо истираемого уплотнительного материала, работоспособного при столь высоких температурах, является весьма сложной задачей.

На основании опыта работы ВИАМ и зарубежных фирм в настоящее время принята концепция создания специального блока в системе уплотнений. Он включает в себя контакт-

Таблица 1

**Характеристики истираемого уплотнительного материала
на основе дискретных волокон Fe–Cr–Al–Y с покрытием SiC–SiO₂**

Показатели	Значения показателей
Рабочая температура, °С	1100
Плотность, г/см ³	≤2,2
Пористость, %	≥60
Истираемость (соотношение износов уплотнительного материала и лопатки)	(5–6) : 1
Жаростойкость (привес после 100 ч работы), %	≤1,5
Термостойкость (число циклов $T_{\text{раб}} \approx 20^\circ\text{C}$ без видимых разрушений)	Не менее 100
Эрозионная стойкость, усл. ед.	≥500
Твердость НВ, кг/мм ²	≤9

ную пару трения: торец лопатки с высокотемпературным абразивно-износостойким материалом на конце и элемент уплотнения на корпусе ТВД, обладающий хорошей истираемостью в условиях врезания (рис. 2).

Одной из основных задач НИР являлась также разработка технологического процесса изготовления абразивно-износостойкого материала на основе систем Ni–Cr–Al–Y и Ni–Al с тугоплавкими оксидами для упрочнения торцов лопаток. С этой целью проведен выбор составов абразивно-износостойкого материала на рабочие температуры 1100–1200°C: в качестве основного материала выбраны сплавы системы Ni–Al и Ni–Al–Cr–Al–Y в виде порошковых композиций, а в качестве функционального наполнителя – диоксиды гафния и циркония. Разработана технология изготовления абразивно-износостойкого материала на рабочие температуры 1100 и 1200°C с определением оптимальных значений техноло-

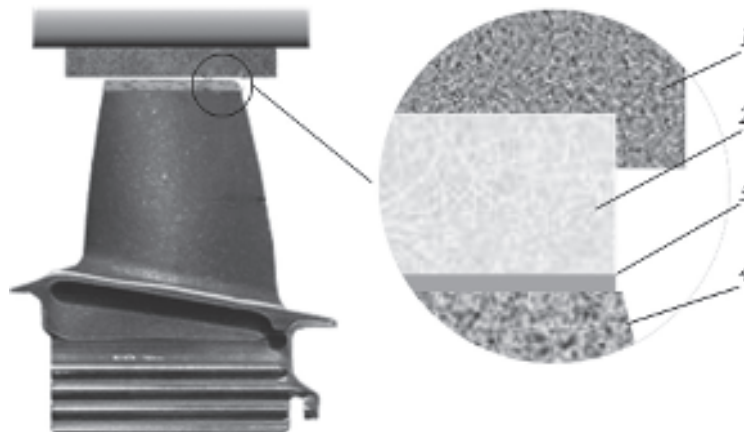


Рис. 2. Упрочненная лопатка в паре с истираемым уплотнительным материалом:
1 – истираемый уплотнительный материал из металлических волокон с жаростойким покрытием; 2 – абразивно-износостойкий материал; 3 – паяный шов; 4 – перо лопатки

Таблица 2

Свойства разработанной контактной пары на рабочую температуру до 1100°C

Характеристика	Значения характеристик	
	для истираемого материала	для абразивно-износостойкого материала
Плотность, г/см ³	≤2,2	7,9—8,0
Пористость, %	≥60	8—9
Эрозионная стойкость, усл. ед.	≥500	≥2000
Жаростойкость (привес после 100 ч при 1100°C), %	≤1,65	≤0,49
Твердость НВ HRC	8—9 —	— ≥40
Термостойкость (число циклов $T_{\text{раб}} \rightleftharpoons 20^{\circ}\text{C}$ без разрушения)	Не менее 100	
Прочность паяных соединений с металлическими подложками	Выше прочности истираемого материала	Выше прочности на разрыв абразивно-износостойких материалов
Истираемость	(6÷8) : 1	

гических параметров по удельному давлению прессования, температуре спекания, продолжительности выдержки и среды – как для изготовления в вакуумной печи, так и при горячем прессовании.

Свойства разработанной контактной пары на рабочую температуру до 1100°C представлены в табл. 2.

Результаты выполненной научно-исследовательской работы были реализованы применительно к газогенератору перспективного ТРДД в классе тяги 9–18 т на ОАО «Авиадвигатель» (г. Пермь).

Необходимо было отработать технологию изготовления прирабатываемой пары, что позволяло оптимизировать радиальный зазор между рабочими лопатками и статором турбины во время эксплуатации двигателя. В результате, создана технология изготовления и пайки истираемого материала на основе металлических волокон системы Fe–Cr–Al–Y с деталями сектора кольца (разрезного) из сплава ВКНА-1ВР и нанесения жаростойкого защитного керамического покрытия на волокна во всем объеме материала. Разработана также технология изготовления и пайки абразивного износостойкого композиционного материала (КМ) на основе сплава ВКНА с функциональным наполнителем в виде оксидных порошков к модельному образцу с равноосным литьем из сплава ЖСЗ6 (сплав рабочих турбинных лопаток); изготовлены модельные образцы прирабатываемой пары для исследования их основных эксплуатационных свойств – жаростойкость, термостойкость, эрозионная стойкость, твердость и исти-

раемость. Разработаны технологические приемы нанесения жаростойких керамических покрытий на истираемый материал, обеспечивающих повышение жаростойкости уплотнительных узлов турбины с 900 до 1100°C.

Разработанная технология изготовления абразивно-износостойкого материала, режимы пайки и составы припоев позволяют упрочнять торцы лопаток, обеспечивая увеличение их ресурса в 2–3 раза.

На заключительном этапе работы проведена пайка прирабатываемой пары: абразивно-износостойкого

материала на торцах рабочих лопаток турбины и истираемого материала на секторах кольца (разрезного) ступени ТВД с последующим нанесением жаростойкого керамического покрытия на истираемый материал (рис. 3); детали переданы для контрольных испытаний в составе технологического двигателя.

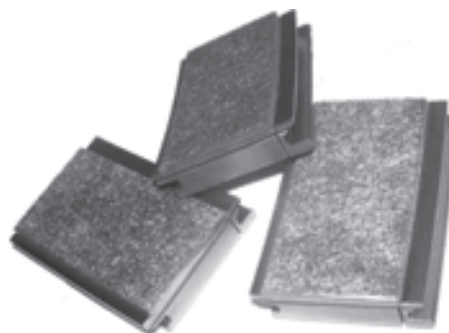


Рис. 3. Детали ТВД с истираемым уплотнительным материалом из волокон системы Fe(Ni)–Cr–Al–Y

*Е.Н. КАБЛОВ, В.В. СИДОРОВ,
В.Е. РИГИН, А.В. ГОРЮНОВ*

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ ПОЛУЧЕНИЯ ПРУТКОВЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ ЛИТЕЙНЫХ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ НОВОГО ПОКОЛЕНИЯ

ВИАМ – ведущий отечественный разработчик литейных жаропрочных сплавов для турбинных и сопловых лопаток авиационных газотурбинных двигателей (ГТД) и наземных энергетических газотурбинных установок (ГТУ) и единственный в Российской Федерации разработчик супержаропрочных сплавов для рабочих лопаток с монокристаллической структурой перспективных ГТД пятого и шестого поколений.

Как показывает отечественный и зарубежный опыт, важнейшим условием получения высоких технических и технологических свойств жаропрочных суперсплавов для монокристаллического литья является технология их производства, которая должна обеспечить такие показатели материала, как стабильность химического состава в минимально узких пределах легирования; ультранизкое содержание вредных примесей: углерода, серы, газов (кислорода, азота), примесей цветных металлов (свинца, висмута, серебра, теллура, таллия и др.), неметаллических включений; плотное, с минимальным количеством усадочных дефектов, строение полученных литых прутковых заготовок, их высокий выход годного.

Для обеспечения перспективных ГТД разработанными в ВИАМ литейными жаропрочными суперсплавами (ЖС36-ВИ, ВЖМ4-ВИ, ВЖМ5-ВИ, ВКНА-1В-ВИ, ВКНА-25-ВИ и др.) создана технология производства, которая включает:

– корректировку химического состава сплавов в процессе выплавки;