



ЭФФЕКТИВНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ ЛОПАТОК ВЫСОКОТЕМПЕРАТУРНЫХ ТВД

ФГУП "ГНЦ ЦИАМ им. П.И. Баранова"

Александр Сергеевич Новиков, д.т.н., заместитель генерального директора,
Сергей Валентинович Харьковский, к.т.н., начальник отдела газовых турбин,
Анатолий Александрович Мухин, научный сотрудник

В статье представлен опыт разработки в России лопатки с проникающей системой охлаждения. Показаны преимущества проникающей системы перед другими системами охлаждения.

The article presents the experience of creating in Russia a blade with a penetrating cooling system. Showing the benefits of the penetrating system before other cooling systems.

Ключевые слова: Лопатка, турбина, охлаждение, проникающая, двухстенная.

Keywords: Blade, turbine, cooling, penetrating, dualcorps

В связи с увеличением степени сжатия и ростом температуры газа перед турбиной в перспективных двигателях и в соответствии с ужесточением требований к высокой экономичности ТРДД возрастает актуальность поиска путей обеспечения надежности лопаток турбины.

Исследования по повышению надёжности работы лопаток ведутся в нескольких направлениях. Первое направление - это создание новых металлических сплавов с жаропрочными и жароупорными свойствами, лучшими, чем у применяемых в настоящее время. Второе направление - это разработка керамических и спеченных материалов. И наконец, третье направление - повышение тепловой защиты охлаждаемых лопаток турбины.

При ограничении, связанном с применением современных жаропрочных монокристаллических сплавов, существуют три концепции повышения тепловой защиты - это, во-первых, увеличение расхода охлаждающего воздуха, что связано с риском ухудшения экономичности двигателя, во-вторых, это разработка более эффективных систем охлаждения, чем применяемые в настоящее время, и, в третьих, применение теплозащитных покрытий (ТЗП).

Наиболее распространенные на данный момент керамические теплозащитные покрытия (ТЗП) на основе диоксида циркония, стабилизированного оксидом иттрия (YSZ), могут эксплуатироваться при рабочих температурах не более 1200°C. Превышение этой температуры ведет к интенсивному спеканию керамического слоя и повышению коэффициента теплопроводности, а также к фазовым превращениям, приводящим к сколу керамики.

В связи с этим актуальной задачей является разработка ТЗП с рабочими температурами до 1350...1400°C, обладающего высоким сопротивлением спеканию и фазово-структурной стабиль-

ностью, низким коэффициентом теплопроводности, высокими прочностными и теплофизическими характеристиками, высокой эрозионной и коррозионной стойкостью. Специалистами разных стран ведутся обширные научные исследования по поиску оптимальных состава (добавление к стандартной системе YSZ дополнительных стабилизирующих оксидов и разработка новых материалов) и структуры (многослойная структура, различная ориентация столбчатой структуры, и др.) керамического слоя. ФГУП "ВИАМ" ведет разработку высокотемпературного покрытия на основе диоксида циркония с добавлением одного или более редкоземельных материалов, среди которых наилучшие результаты показывает система Zr-Y-Gd (для проекта ПД-14 разрабатывается с 2009 года). Работы по определению технологии нанесения ведутся в ОАО "Авиадвигатель" на установке ALD с 2012.

Комплекс необходимых экспериментальных исследований свойств и работоспособности ТЗП в условиях, приближенных к эксплуатационным, на моделях и натурных деталях должен включать в себя следующие задачи: определение адгезионной и когезионной прочности, эффективности теплозащиты, коэффициента температурного расширения.

Целесообразным представляется организация системного поиска состава и технологии ТЗП при сотрудничестве ведущих двигателестроительных фирм, академической и ВУЗовской науки.

Наиболее разработанными сегодня являются лопатки с развитым конвективно-пленочным охлаждением. Развитие и совершенствование таких схем происходило по пути оптимизации течения воздуха в радиальных каналах лопатки и повышения эффективности заградительного охлаждения. Развитые конвективно-пленочные системы применяются на двигателях ведущих фирм - General Electric, Pratt&Whitney, RollsRoyce, Snecma. В России, так же как и в мировом двигателестроении, получили распространение схемы с многоканальным течением воздуха - в ОКБ Перми, Санкт-Петербурга, но также успешно применяются и схемы с матрицами компланарных каналов - в ОКБ Рыбинска, Москвы и Самары. Как показывают расчетные и экспериментальные исследования, проведенные в ЦИАМ, по эффективности указанные схемы примерно одинаковы (0,6-0,65) при одинаковом относительном расходе. Применение схем развитого конвективно-пленочного охлаждения позволило обеспечить работу турбины при температуре газа 1800-1850 К. Применение ТЗП позволило бы увеличить температуру газа перед турбиной, либо уменьшить расход охлаждающего воздуха.

Для рабочей лопатки первой ступени (РЛ1) ТВД двигателя ПД-14 применена конвективно-пленочная многоканальная система охлаждения в сочетании с ТЗП. Как показывают расчеты, для ТЗП с ожидаемым значением теплопроводности $\lambda = 1,6 \text{ Вт/(м К)}$, при выбранной толщине слоя ТЗП, значение эффективности охлаждения лопатки на режиме "RedLine" составляет $\theta_{ср} = 0,67$. Достоинством схемы охлаждения является то, что за счет уменьшения площади каждого канала увеличивается теплоотдача внутри лопатки,

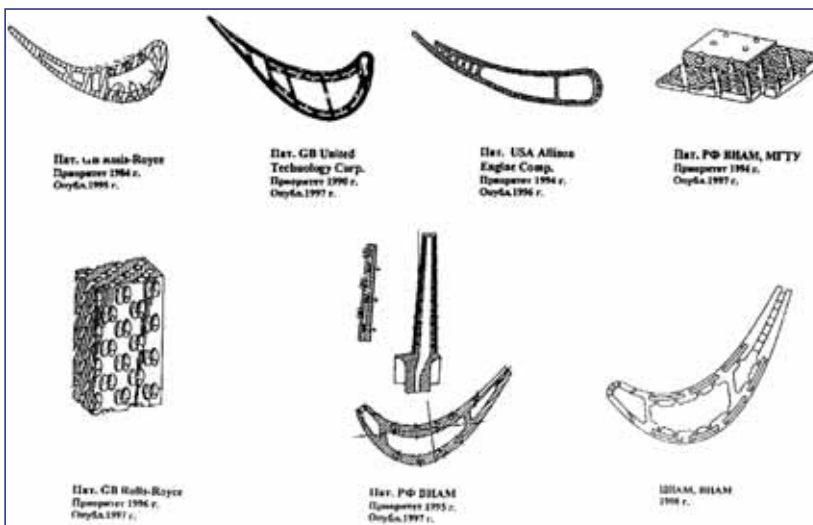


Рис. 1. Некоторые патенты по проникающему охлаждению лопаток

За время подготовки статьи к печати, 10.03.2017 г. скончался заместитель генерального директора ЦИАМ им. П.И. Баранова, доктор технических наук, наш постоянный автор и член Редакционного совета журнала "Двигатель" Александр Сергеевич Новиков. Наше глубокое сочувствие родным, близким и коллегам нашего товарища.



а, следовательно, улучшается охлаждение. С другой стороны, эта схема имеет один существенный недостаток - каждый поворот потока приводит к заметному падению давления в каналах охлаждения, что усложняет использование этой схемы, так как ограничивает возможность увеличения скорости в каналах. Кроме того, из-за снижения давления при поворотах существенно ограничены возможности по расположению мест выпуска воздуха для заградительного охлаждения.

Для РЛ1 ТВД расчетная температура покрытия на режиме "Red Line" составляет от 1250 до 1350°C, что намного выше допустимой температуры для покрытия.

Ожидать в ближайшие несколько лет появления высокотемпературного ТЗП, способного сохранять необходимые свойства при температуре не менее 1350°C, видимо, не приходится. Следовательно, для решения задачи создания ПД-14, и разумеется ПД-35, в котором температура газа будет на 50-100 К выше, необходимо разрабатывать более эффективные схемы охлаждения, которые позволили бы либо обойтись без ТЗП, либо применить имеющееся покрытие.

Как показывает многолетний опыт ЦИАМ по исследованию различных схем охлаждения, перспективные системы охлаждения могут основываться на концепции системы "проникающего" охлаждения.

Работы по созданию турбинных лопаток с проникающей системой охлаждения давно ведутся на крупнейших зарубежных двигателестроительных фирмах, таких как General Electric, Pratt&Whitney, RollsRoyce и т.д. Приоритет фирмы RollsRoyce датирован 1984 г. У разновидностей проникающей схемы имеются различные названия "SuperCooling", "CastCool", "Lamilloy", "Dual-wall cooling".



Рис. 2. Профиль лопатки на "жестких" стержнях

Создание таких лопаток становится возможным только при применении принципиально новой технологии их изготовления. Известно много предложений по конструкции лопаток с проникающим охлаждением. На рис. 1 представлено несколько патентов таких конструктивных решений проникающего охлаждения. Необходимо отметить, что во всех случаях при охлаждении лопатки используется комбинированное охлаждение: входная кромка охлаждается посредством отверстий перфорации, выходная - сочетанием внутреннего конвективного с заградительным охлаждением.

В ЦИАМ работы по созданию лопатки с проникающим охлаждением ведутся с середины 1990-х годов. Начало работ было положено В.П. Почевым и А.А. Мухиным. Ключевой проблемой оказалась задача разработки новой технологии изготовления лопатки. Большая работа по определению технологии изготовления литейных стержней проведена в ФГУП "ВИАМ". Первый патент на составной литейный стержень получен в "ВИАМ" в 1995 г., а совместно с ЦИАМ в 1997 г. [1]. Первая лопатка с проникающей системой охлаждения (рис. 2) применительно к экспериментальному газогенератору ВТ-68 была изготовлена по технологии "жестких" стержней на серийном оборудовании с использованием промышленной технологии на ММПП "Салют" в 1999-2000 г.г. Экспериментальные исследования эффективности охлаждения лопатки проведены на установке ЦИАМ в 2001 г. и подтвердили высокую глубину охлаждения. Так, максимальное местное значение достигало 0,8, минимальное 0,57...0,6, при расходе охлаждающего воздуха 5...5,5%.

Однако применение технологии "жестких" стержней оказалось возможным только для простых вариаций системы охлаждения. Для лопаток сложной пространственной формы, спрофилированных на основе современных подходов газовой динамики, с усложнением системы охлаждения, в ВИАМ на уровне "ноу-хау"

была разработана технология "гибких" стержней. Отработка новой технологии происходила в течение ряда лет в ЦИАМ и ВИАМ при участии ММПП "Салют". Работа проходила в инициативном порядке со стороны каждого из предприятий. В результате не удалось отработать технологию лопатки в соответствии с Техническими Условиями. Тем не менее, одна лопатка получилась кондиционной (рис. 3, 4) и прошла испытания по эффективности охлаждения в 2006 г.

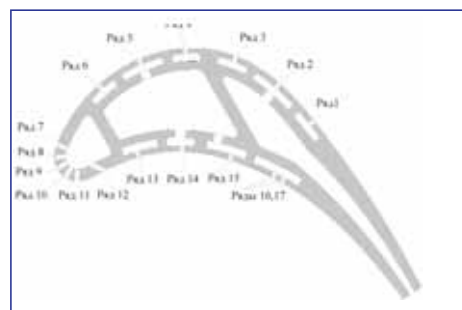


Рис. 3. Поперечное сечение лопатки, созданной с использованием технологии "гибких стержней".

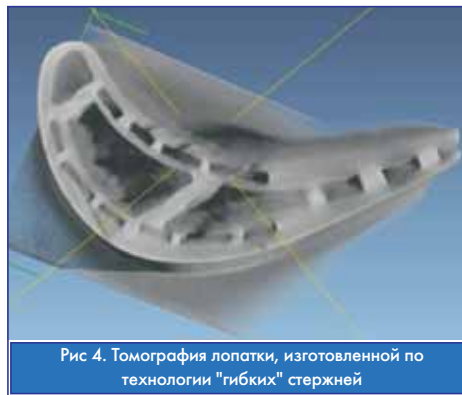


Рис. 4. Томография лопатки, изготовленной по технологии "гибких стержней"

В результате проведения за период 1997-2006 гг. НИОКР в ЦИАМ был получен патент на конструкцию лопатки с двойными стенками "Охлаждаемая лопатка турбины" (RU 2267616 С1, 2006г. совместно с ВИАМ) [2].

В дальнейшем для исследования эффективности охлаждения лопатки изготавливали по аддитивной технологии.

Совместно с НПО "Сатурн" в 2012 году проведена комплексная работа по расчетно-экспериментальному исследованию лопаток с двумя системами охлаждения - с матрицами компланарных каналов, разработки НПО "Сатурн", и проникающей системой охлаждения (схема аналогична рис. 5), спроектированной в ЦИАМ. По расчетной оценке НПО "Сатурн" [4] лопатка с проникающей системой охлаждения имела лучшие показатели по эффективности охлаждения, и примерно одинаковые характеристики по прочности. Экспериментальные результаты подтвердили ожидаемую оценку эффективности охлаждения.

В ЦИАМ проведены расчетно-конструкторские исследования по разработке лопатки с перспективной схемой охлаждения (рис. 5). Схема охлаждения в лопатке с проникающим охлаждением содержит три независимых между собой потока воздуха. Поток воздуха, охлаждающие входную (III) и выходную (VII) кромки, а также поток воздуха (I, II, IV, V и VI), охлаждающий

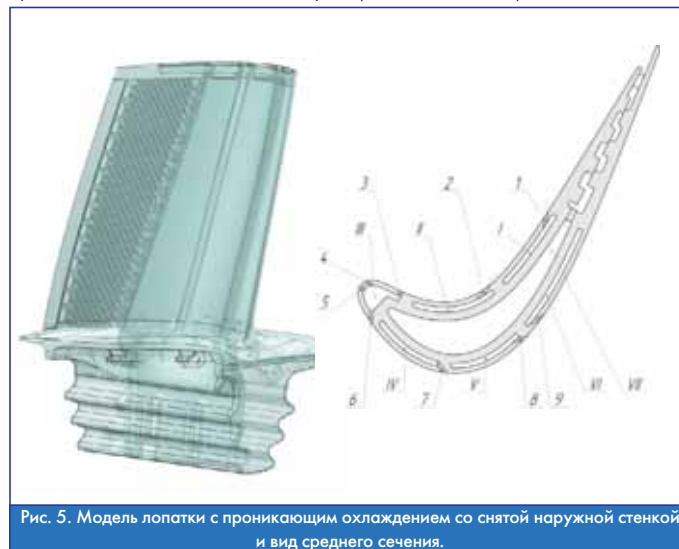


Рис. 5. Модель лопатки с проникающим охлаждением со снятой наружной стенкой и вид среднего сечения.

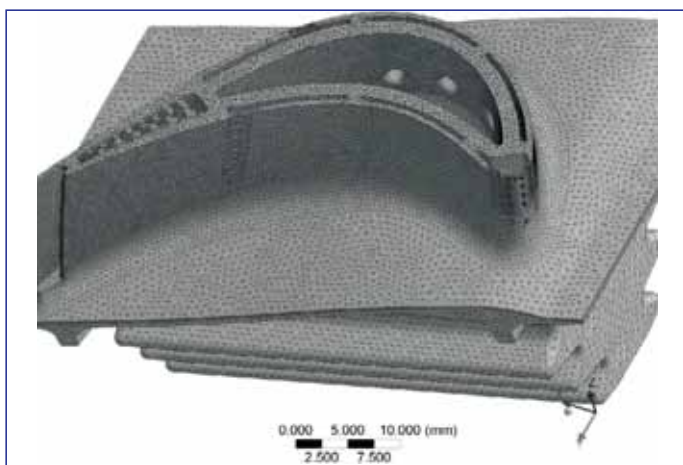


Рис. 6. Фрагмент сетки конечных элементов лопатки с проникающей системой охлаждения

среднюю часть лопатки.

Хладоресурс воздуха всех потоков в соответствующую часть максимальный, так как в каждую часть поступает "свежий" охлаждающий воздух. Охлаждение входной кромки осуществляется воздухом, текущим по радиусу вдоль нее. Для снижения теплового потока во входную кромку используется перфорация (на рис. 5 она обозначена арабскими цифрами). Кроме снижения теплового потока в лопатку, часть тепла снимается в отверстиях перфорации. В рассматриваемой схеме охлаждение центральной части лопатки выполнено с помощью щелевых каналов (I, II, IV, V и VI). Охлаждение входной и выходной кромок выполнено традиционно. Щелевые каналы защищают примерно 50...60 % поверхности лопатки при расходе через них 2,5...3 % воздуха от расхода газа на входе в венец, т.е. не более 50 % расхода воздуха на лопатку. Охлаждение выходной кромки выполняется по конвективно-пленочной схеме, причем расход на конвективную часть охлаждения составляет 1,2...1,5 % и обеспечивается "свежим" (практически неподогретым) воздухом, забираемым из центральной раздаточной полости, а пленочное охлаждение осуществляется воздухом из щелевых каналов, используемым для охлаждения средней части лопатки. Это позволяет существенно уменьшить расход на конвективную составляющую охлаждения выходной кромки.

Кроме того, в схеме с проникающей системой охлаждения выпуск отработанного воздуха из щелевых каналов производится в торец лопатки, что улучшает охлаждение торца, охлаждение которого становится при повышении температуры газа также актуальным.

Фрагмент сетки конечных элементов лопатки показан на рис. 6, поле температур на режиме "Red Line" показано на рис. 7. Максимальная температура лопатки не превышает допустимую температуру для материала 1150°C. Расчеты на прочность показали, что лопатка может быть использована на перспективных двигателях.

На рис. 8 [5] показано сравнение эффективности развитой

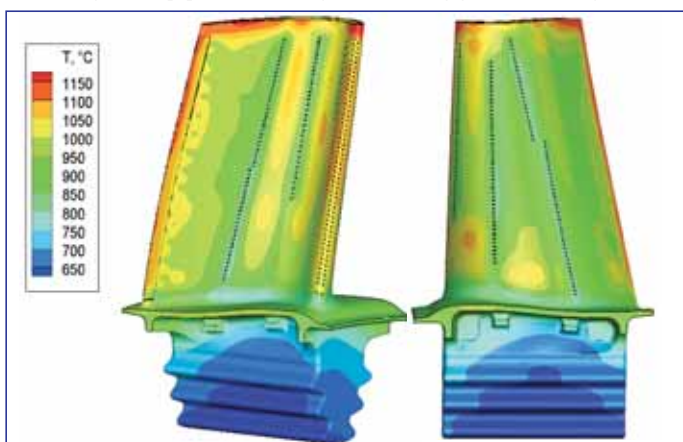


Рис. 7. Рабочая лопатка ТВД с проникающим охлаждением. Температура внешней поверхности лопатки.

конвективно-пленочной и проникающей систем охлаждения применительно к лопатке РЛ1 ТВД ПД-14. Вариант Blade B1 - развитая конвективно-пленочная система без ТЗП; вариант Blade B1 (TBC) - то же, но с ТЗП; вариант Blade B6 - проникающая система охлаждения. Видно, что при одинаковом расходе на охлаждение (около 5% по расходу на входе в компрессор) эффективность охлаждения по внешней поверхности лопатки выше для вариантов Blade B1 на 0,03 и Blade B1 (TBC) на 0,06, чем для варианта с проникающей системой. Однако, для средней по сечению эффективности преимущество в 0,09 уже у варианта Blade B6.

Можно сказать, что накопленный в ЦИАМ опыт по комплексному расчетно-экспериментальному исследованию лопаток с проникающей системой охлаждения показывает несомненное преимущество по эффективности данной системы перед другими, в первую очередь, в сравнении с развитым конвективно-пленоч-

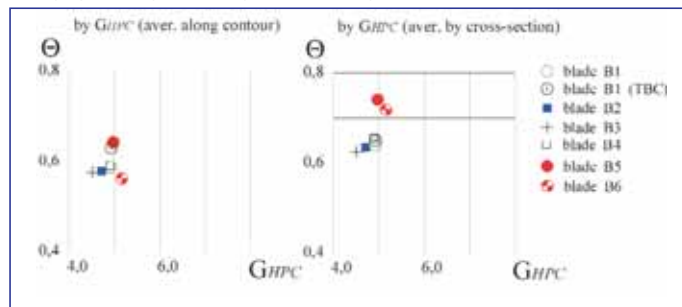


Рис. 8. Сравнение эффективности развитой конвективно-пленочной и проникающей систем охлаждения

ным охлаждением.

За рубежом активно разрабатываются технологии изготовления лопаток с проникающей системой охлаждения. В последние годы Rolls-Royce запатентовала высокоэффективную схему охлаждения в двустенных лопатках и производит такие лопатки из монокристаллического сплава CMSX-4 по технологии CastBond, что позволило достичь глубины охлаждения $\theta \cong 0,8$. [6, 7]. По данным Rolls-Royce лопатки прошли испытания на прочность и планируется их исследование в составе газогенератора. □

Литература

1. Шалин Р.Е., Качанов Е.Б., Каблов Е.Н., Светлов И.Л., Почуев В.П., Демонис И.М., Фоломейкин Ю.И., Герасимов В.В., Сурков А.М., Мухин А.А., Составной керамический стержень для литья полых охлаждаемых изделий // Патент RU 2090299, 1997г., ФГУП "ВИАМ"
2. Почуев В.П., Мухин А.А., Харьковский С.В., Светлов И.Л., Охлаждаемая лопатка турбины // Патент RU 2267616 С1, 2004г., ФГУП "ЦИАМ им. Баранова"
3. Почуев В.П., Харьковский С.В., Мухин А.А., Светлов И.Л., Рыкачев Ю.Ю. Перспективные системы охлаждения лопаток высокотемпературных турбин авиационных двигателей Сборник статей "Научный вклад в создание авиационных двигателей" Книга 2. ЦИАМ, 2000.
4. Научно-технический отчет №462-139-70-337-ТО-2012 ОАО "НПО "Сатурн". Разработка технологии и изготовление образцов рабочей лопатки ТВД с перспективной системой охлаждения. Карелин Д.В., Воинов В.В., Пиотух С.М., Томилина Т.В., 2012 г.
5. S.V. Kharkovskiy, A.A. Mukhin, INVESTIGATION THE EFFICIENCY OF VARIOUS COOLING SCHEMES OF HIGH-TEMPERATURE TURBINE BLADES, 30th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, Daejeon, Korea, 2016.
6. FAA Continuous Lower Energy, Emissions & Noise (CLEEN) Technologies Rolls-Royce Program Overview 8 November 2012
7. Randolph Clifford Helming, Evaluation technique for bond3ed dual wall static and rotating Airfoil Materials, Патент US 8215181131, 2012, Rolls-Royce North American Technologies.

Связь с авторами: dep018@ciam.ru

