

ОПТИМИЗАЦИЯ СИСТЕМЫ КОНВЕКТИВНО-ПЛЁНОЧНОГО ОХЛАЖДЕНИЯ РАБОЧИХ ЛОПАТОК ТУРБИНЫ ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ И ПЕРСПЕКТИВНЫХ ГТД

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)" (МАИ)
Ле Тиен Зыонг, аспирант кафедры 203,
Валерий Григорьевич Нестеренко, к.т.н., доцент

Представлены результаты расчётных исследований различных конструктивных схем и конфигураций охлаждаемых бандажных полок рабочих лопаток турбины высокого давления современных и перспективных авиационных ГТД.

The results of design studies of various design schemes and configurations of the cooled shroud high-pressure turbine blades for modern and perspective aviation gas turbine engines are presented.

Ключевые слова: бандажная полка, турбина, рабочая лопатка, температура, напряжения, эффективность системы охлаждения.

Key words: shroud, turbine, turbine blade, temperature, stress, efficiency cooling system.

В данной статье рассматриваются результаты работы по оптимизации формы бандажной полки, схемы её конвективно-плёночного охлаждения, а также особенности проектирования профильной части пера бандажированных рабочих лопаток турбин высокого давления (ВД) двухконтурных авиационных воздушно реактивных двигателей с форсажем (ТРДДФ). Во многих современных ТВД бандажная полка на лопатках турбины ВД не установлена, хотя при постановке бандажной полки повышается КПД и снижаются потери давления газа в концевой части пера лопатки ротора турбины ВД. Кроме того, снижается вибрационная составляющая в действующих напряжениях лопатки, что очень важно с точки зрения обеспечения высокого уровня их ресурса и надёжности. Как известно, ресурс горячей части ТРДДФ примерно в два раза меньше ресурса его холодной части. Актуальны работы по уменьшению этой разницы, приближения ресурса горячей части ГТД к ресурсу его холодной части.

Известно, что постановка бандажной полки в концевой части пера лопатки приводит к дополнительным напряжениям растяжения по всей её длине, от полки до замка лопатки, которые необходимо компенсировать за счёт их более интенсивного охлаждения, применения эффективных теплозащитных покрытий [1] и лучших материалов с повышенными механическими свойствами [2]. Эффективные теплозащитные покрытия (ТЗП) и новые жаропрочные материалы хорошо известны, они применяются в большом числе отечественных и иностранных авиационных ГТД, например, в ТРДД ПД14, LEAP, PW 1400 др. Однако, только в авиационных двигателях фирмы Роллс-Ройс, таких как семейства ТРДД RB 211 524 и ТРЕНТ применяются бандажированные лопатки турбины ВД, несмотря на очень высокий уровень температуры газа перед турбинами этих двигателей.

Известен целый ряд проектных решений, которые способствуют возможной установке бандажных полок на современных рабочих лопатках ТВД, кроме применения самых лучших материалов для их изготовления и теплозащитных покрытий. Так, например, можно формировать радиальную эпюру температуры газа на входе в турбину таким образом, чтобы на периферии лопаток турбины температура газа снижалась, в большей или меньшей степени. Проектировать полку, перекрывающую только часть межлопаточного канала и т.д.

При исследовании так называемой "газодинамической" полки в ТВД турбины ВД ТВВД НК 93 [3] установлено, что наиболее эффективным способом охлаждения бандажных полок является их конвективное внутри стеночное охлаждение и охлаждение с помощью отверстий перфорации на корытце, в подположном сечении лопатки. При малом расходе охлаждающего воздуха примерно 0,15% и 0,18%, соответственно, температура полки снижается с корытца на 54° в обоих этих способах, со спинки - на 29° и 12°, соответственно. Можно отметить совсем ничтожный уровень снижения температуры такой полки, поэтому целесообразно исследовать и другие варианты проектирования такого типа с целью повышения его эффективности.

На Рис. 1 представлена рабочая лопатка турбины фирмы Роллс Ройс [4] с конвективным охлаждением полки, в толщине которой выполнен ряд каналов - как это показано на рис. 4б),

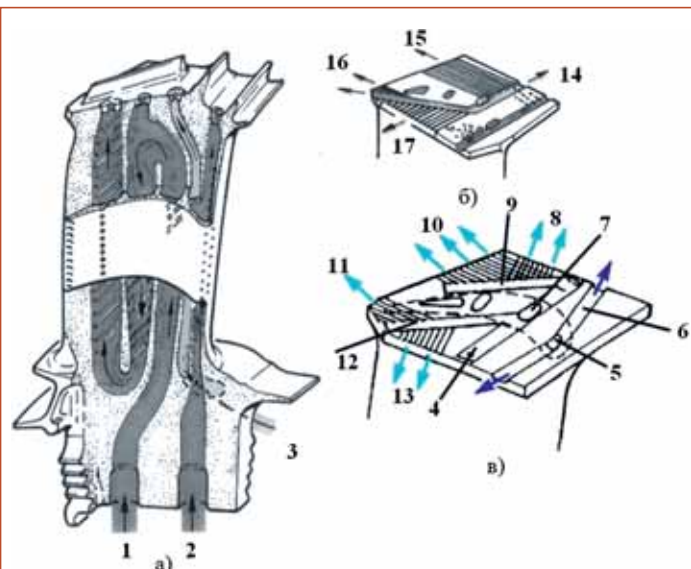


Рис. 1 Лопатка турбины фирмы Роллс-Ройс с конвективным охлаждением бандажной полки

каналы 15, 16 и 17, питаемые из раздаточного канала 14. Аналогично, на рис. 4в, показаны - раздаточные каналы 4, 5, 6, 7 и 9 и каналы конвективного охлаждения 8,10,11и 13. Проектировщиков этих конструкций не смущают технологические сложности и затраты на изготовление такого типа лопаток, поскольку выигрыш в уровне надёжности и ресурса всей турбины существенно важнее.

На Рис. 2а показана полочная лопатка турбины ВД, име-

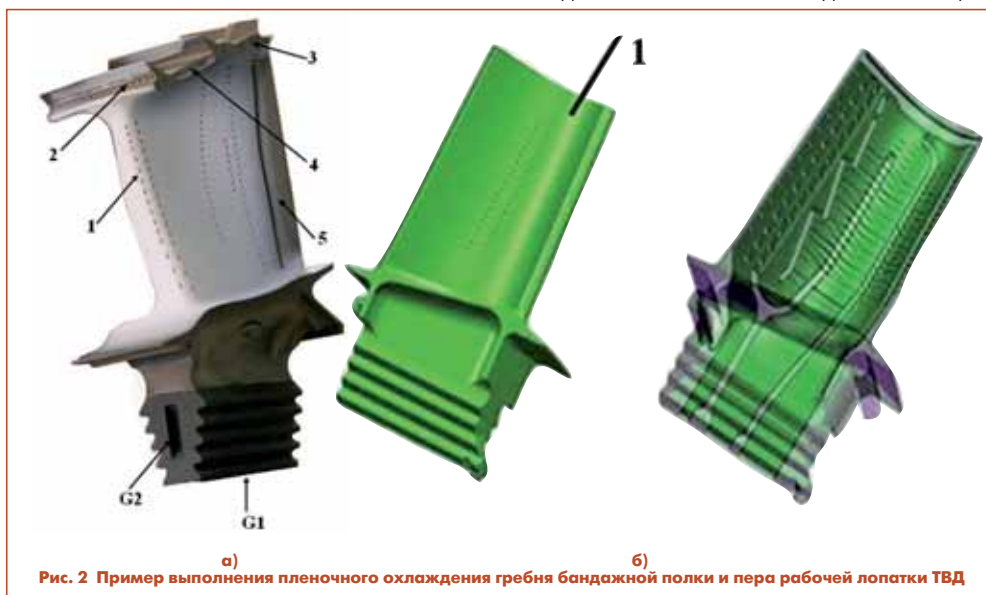


Рис. 2 Пример выполнения плёночного охлаждения гребня бандажной полки и пера рабочей лопатки ТВД

ющая плёночное охлаждение, отверстия 1 и 2, расположенные на профильной части пера лопатки и в корне переднего гребня, установленного на её полке. Эта полочная лопатка спроектирована с плёночным охлаждением переднего гребня бандажной полки, поскольку при высокой температуре газа на входе в турбину $1750\text{K} \leq T^*_{г} \leq 1900\text{K}$ торцевая, наружная кромка гребня обгорает.

Там же, на Рис. 2б показана охлаждаемая бесполочная лопатка турбины ВД ТРДДФ РД 93, где температура газа на входе в турбину равна 1720К. Она спроектирована сравнительно недавно, с конвективно-плёночным охлаждением пера лопатки, максимальная температура пера лопатки равна 924К, однако бандажной полки на ней нет. Величина интенсивности охлаждения этой лопатки $\theta_{ср} = 0,47$ при расходе охлаждающего воздуха 3,6%. Очевидно, что эта интенсивность охлаждения может быть увеличена, примерно до 0,54...0,57, т.е. примерно на 15...21% , с пропорциональным увеличением расхода охлаждающего воздуха.

На Рис. 3 представлены геометрические размеры бандажной полки, установленной на рабочей лопатке турбины, показанной на Рис. 2б).

При проектировании полки площади поперечных сечений пера этой лопатки были увеличены за счёт толщин и длин про-



Рис. 3 Конфигурация бандажной полки, установленной на лопатке турбины ВД, представленной на Рис. 2б

Таблица 1. Увеличение площади поперечных сечений модифицированной лопатки турбины ВД ТРДДФ РД 93 по её высоте

h (мм)	0	2	8	18	28	31	38	45	46
F ₁ (мм ²)	220,5	185,6	170,5	135,3	111,9	100,4	74,2	91,7	129,0
F ₂ (мм ²)	253,2	207,9	184,3	154,8	129,0	121,9	105,7	100,6	116,2

дольных ребер, имеющихся в её полости. При этом, наружный контур лопатки удалось сохранить неизменным. Численные значения величин площади поперечных сечений модифицированной лопатки, по всей высоте её профильной части, показаны в таблице 1, где F₁ - площади поперечных сечений исходной лопатки, а F₂ - модифицированной, с бандажом.

На Рис.4а и 4б показано изменение напряжений растяжения S_p и запасов прочности К лопатки, представленной на Рис. 2б, при установке на ней бандажной полки.

В рассматриваемой лопатке удалось обеспечить требуемый запас прочности как бандажной полки, за счёт её конвективно-плёночного охлаждения, так и профильной части пера, по всей её высоте, за счёт увеличения площади поперечных сечений пера лопатки и замены материала ЖС 26, из которого она была изготовлена, на более эффективный, ренневый сплав ВЖМ 8, характеристики которых

показаны на Рис.5, где параметр $P = T \cdot [\lg(100) + 20]$, а величи-

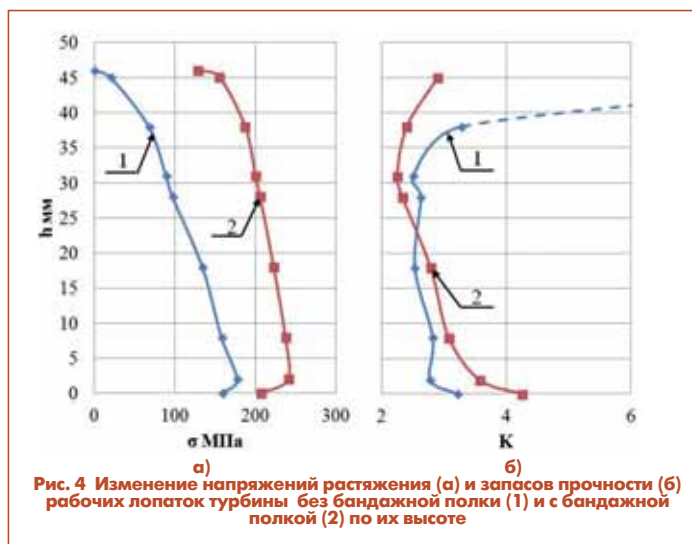
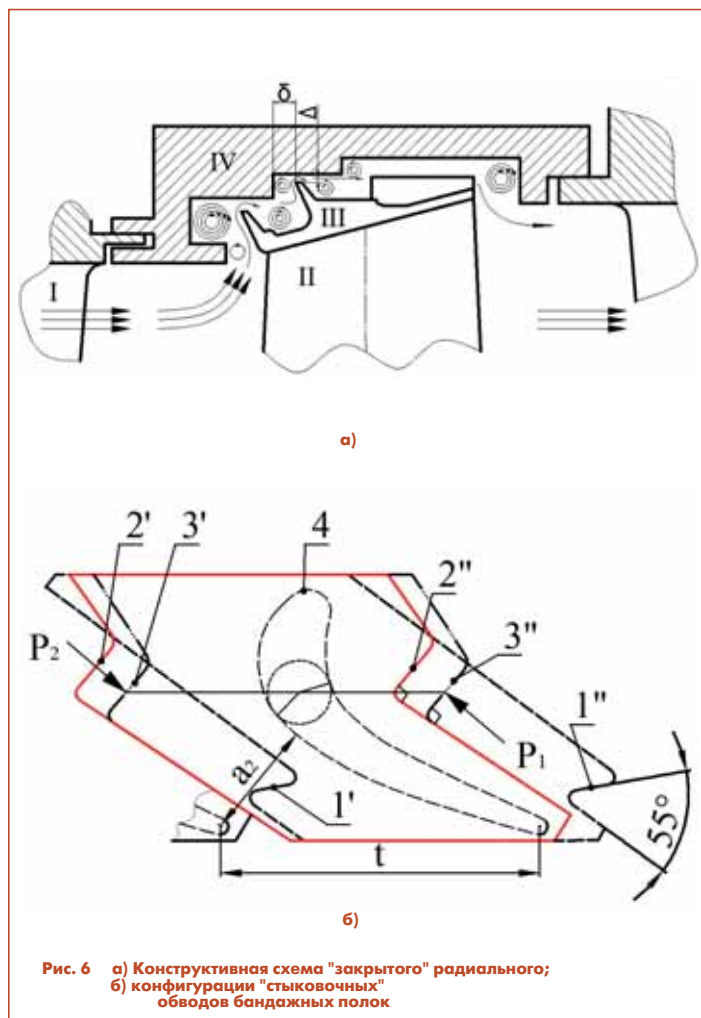
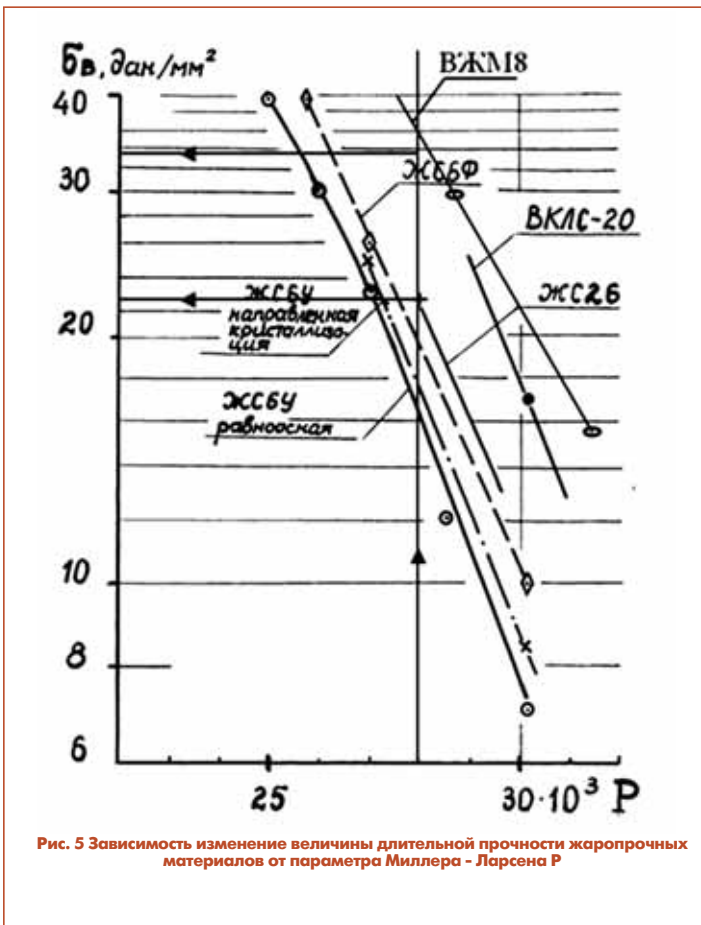


Рис. 4 Изменение напряжений растяжения (а) и запасов прочности (б) рабочих лопаток турбины без бандажной полки (1) и с бандажной полкой (2) по их высоте

на T - в градусах Кельвина. В расчётах действующих напряжений заложено следующее изменение температуры лопатки по её высоте: в корне $T=810^\circ\text{C}$, в середине $T=965^\circ\text{C}$, на периферии также величина $T=965^\circ\text{C}$.

Эффективность бандажной полки, с точки зрения повышения КПД ступени турбины, существенно возрастает при замене прямого лабиринта на ступенчатый, как это показано на Рис. 6а. В этом случае коэффициент расхода лабиринта и утечки газа в радиальном зазоре над лопаткой уменьшаются примерно в 2,0...2,5 раза.

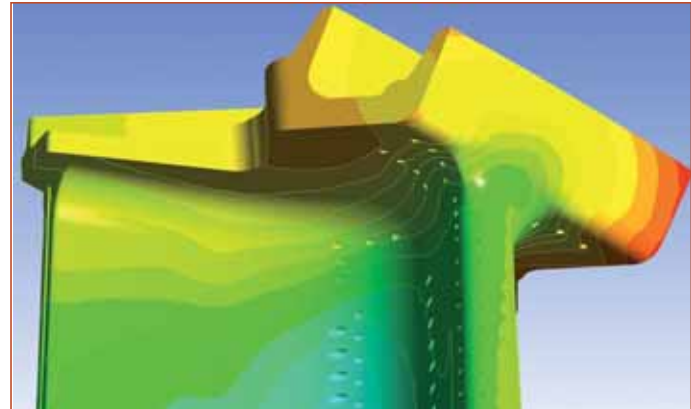
На Рис. 6б: (1'-1"), (2'-2"), (3'-3") - стыковочные поверхности различных вариантов конфигурации бандажной полки; 4 - подположное сечение пера лопатки;



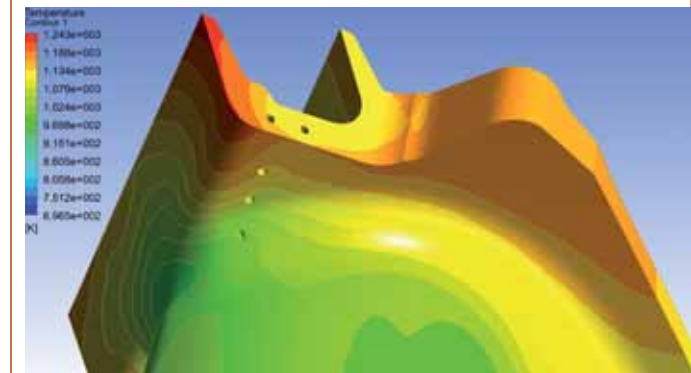
p - контактный натяг, возникающий при сборке бандажированных рабочих лопаток ротора турбины; a - горло решётки на периферии ротора.

Из трёх вариантов конфигурации бандажной полки, показанных на Рис. 6б), наиболее благоприятный вариант - это 2. При этом анализе следует учитывать, что на вогнутой стороне лопатки её температура примерно на 50...100 градусов выше, чем температура её спинки. Поэтому допустимые напряжения там будут существенно ниже и окружной размер полки с этой стороны должен быть как можно короче. Основная длина полки в окружном направлении должна располагаться с противоположной стороны.

На Рис. 7 показаны результаты расчётов теплового состояния периферийной части охлаждаемых лопаток и внутренних по-



а)



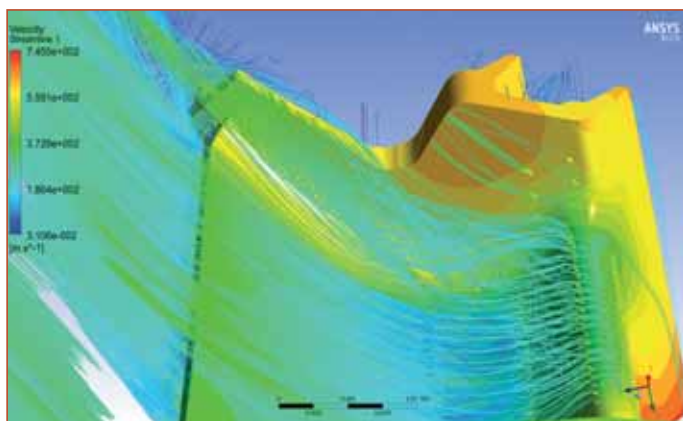
б)

Рис. 7 Результаты расчётов температурного состояния бандажной полки и подполочного сечения пера: а) вогнутой стороны лопатки; б) выпуклой стороны бандажированной лопатки турбины ВД

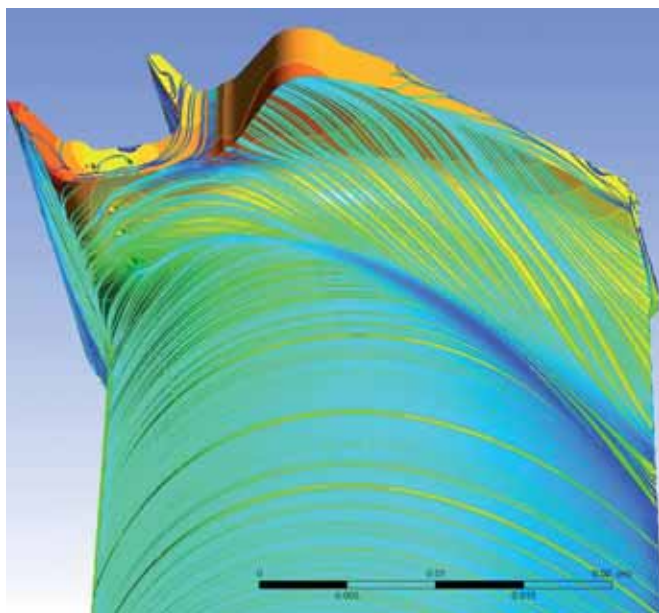
верхностей бандажной полки, выполненные в системе ANSYS CFX. Интенсивность теплоподвода к бандажной полке от горячего газа, протекающего с её внутренней стороны, формирующей проточную часть турбины, существенно выше, чем с её наружной стороны, где имеется радиальный зазор и установлено лабиринтное уплотнение, ограничивающее поток газа. Поэтому именно на внутренней поверхности необходимо интенсивное плёночное охлаждение бандажной полки. Здесь охлаждающий воздух выпускается из внутренних каналов через ряд отверстий (см. Рис. 7), соединённых с каналами, находящимися в толщине полки. Верхняя поверхность полки, где теплоподвод существенно меньше, охлаждается конвективно.

Ниже, на Рис. 8 показаны линии тока горячего газа и холодного воздуха, осуществляющего плёночное охлаждение вогнутой а) и выпуклой б) сторон профильной части пера лопатки. Как видно из Рис. 8б, вторичные токи перемещаются в пограничном слое на нижней стороне бандажной полки в осердиальном направлении, к выходу из решётки.

Они создают значительные дополнительные потери энергии газа. Кроме того, они мешают оптимальному охлаждению поверхностей бандажной полки, смещая с неё охлаждающий воздух на спинку пера лопатки, где его охлаждающие свойства не требуются. На Рис. 9 показана конструкция профильной части пера лопатки, где на её периферии, непосредственно у полки, установлен серповидный гребень, препятствующий попаданию вторичных токов горячего газа на спинку лопатки. Эта конструкция может быть реализована при литье лопатки и её использование целесообразно.



а)



б)

Рис. 8 Линии тока горячего газа и охлаждающего воздуха в подполочных участках профильной части пера лопатки со стороны: а) корыта; б) спинки представленной на Рис. 26.

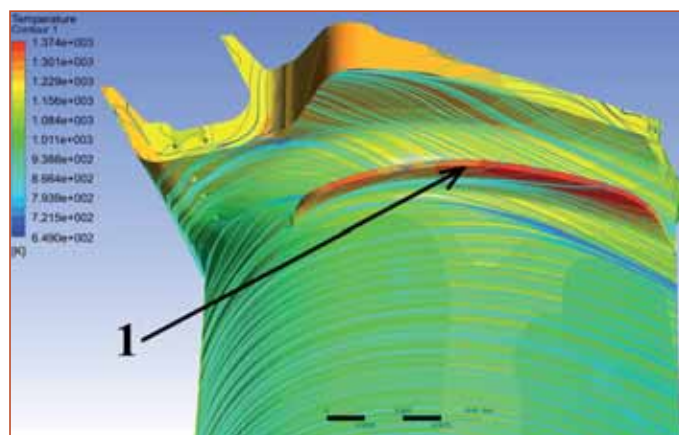


Рис. 9 Конструкция спинки пера лопатки с гребнем 1, установленным под полкой вдоль профиля пера лопатки

Заключение

1. Лопатки ротора высокотемпературных турбин ВД авиационных ГТД целесообразно проектировать бандажированными, с интенсивным конвективно-плёночным охлаждением бандажной полки повышенной толщины, внутри которой можно располагать сеть каналов конвективного охлаждения и вспомогательных раздаточных каналов, куда подаётся охлаждающий воздух из внутренней полости профильной части пера лопатки.
2. Производственная сложность и повышенная стоимость изготовления бандажированных лопаток с конвективно-плёночным охлаждением полки компенсируется повышенным ресурсом работы этих лопаток и ростом КПД ступени турбины.

Литература

1. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Петрушин Н.В., Висик Е.М. Монокристаллический жаропрочный никелевый сплав нового поколения с низкой плотностью // Авиационные материалы и технологии. 2015. №2 (35). С. 14-25.
2. Чубаров Д. А., Будиновский С. А. Выбор керамического материала для теплозащитного покрытия лопаток авиационных турбин на рабочие температуры 1400°C // Труды ВИАМ, 2015, №4, С. 48-53.
3. Горелов Ю.Г., Казуров В.Ф., Михайлов Н.И. Способы охлаждения "газодинамической" бандажной полки рабочей лопатки турбины ВД высокотемпературного ТВВД // Вестник Самарского университета. Аэрокосмическая техника, технологии и машиностроение. 2006. № 2-2(10).
4. Иноземцев А.А. Основы конструирования авиационных двигателей и энергетических установок // учеб. М.: Машиностроение. 2008. Т. 2. - 368 с.
5. Ле Т.З., Нестеренко В. Г. Оптимизация системы конвективно-плёночного охлаждения бандажных полок рабочих лопаток высокотемпературных ТВД // Сборник тезисов Международной конференции "Авиация и космонавтика". - М.: МАИ. 2016. С. 302-303.

Связь с авторами: tienduong86stvn@gmail.com
valerinsterenk@yandex.ru

