

УДК 669.245:541.12017.620.186.2

Е.Н. Каблов¹, О.Г. Оспенникова¹, И.Л. Светлов¹**ВЫСОКОЭФФЕКТИВНОЕ ОХЛАЖДЕНИЕ ЛОПАТОК ГОРЯЧЕГО ТРАКТА ГТД**

DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-2-3-14

Обзорная статья посвящена описанию конструкций двустенных лопаток горячего тракта ГТД. Благодаря наличию центрального и периферийного контуров двустенные лопатки обладают высокоэффективным охлаждением. Наибольшие трудности практической реализации таких схем заключаются в технологии изготовления периферийных контуров охлаждения в тонких стенках лопаток. В настоящее время существуют три технологии оформления периферийных контуров: с помощью составных керамических стержней, с помощью составных гибридных стержней с использованием тугоплавких металлов и методом пайки или сварки.

Ключевые слова: инжекционное охлаждение лопаток, двустенные лопатки ГТД, периферийный контур охлаждения лопаток.

Review article covers the description of double-walled blades structures of GTE hot sections. Due to the presence of central and peripheral circuits the double-walled blades have a highly efficient cooling. The major difficulty of practical realization of such systems consists in manufacturing technology of peripheral cooling circuits in thin walls of the blades. Currently there are three design technologies for peripheral circuit arrangement: ceramic core, hybrid ceramic core with the use of refractory metals and bonding method.

Keywords: injection cooling blades, double-walled blades of GTE, peripheral blades cooling circuit.

¹Федеральное 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

Введение

Повышение рабочих температур деталей горячего тракта газотурбинных двигателей (ГТД) достигается благодаря применению новых высокожаропрочных материалов [1–3], получаемых прогрессивными технологическими методами [4–6], а также использованию различных видов термической обработки [7], включая горячее изостатическое прессование (ГИП). Известно, что в процессе работы материал лопаток горячего тракта современных ГТД может достигать температур 1100–1150°C, поэтому проблема эффективного охлаждения лопаток является чрезвычайно важной. Существуют по крайней мере два пути повышения эффективности воздушного охлаждения. Первый, общепринятый способ, заключается в использовании конвективно-пленочного охлаждения, которое осуществляется путем оптимизации движения воздушных потоков во внутренних полостях лопаток и достижения устойчивости воздушной пелены на внешних поверхностях лопаток. В результате совершенствования конструкций лопаток с конвективно-пленочным охлаждением удалось повысить температуру газа на входе в турбину до 1800–1850 К, что является пределом для данного способа охлаждения.

Второй способ заключается в разработке принципиально новых схем охлаждения, например

таких, как транспирационное и близкое к нему двустенное охлаждение. Транспирационное охлаждение обеспечивает весьма высокую эффективность путем просачивания воздуха через пористую стенку, но большим недостатком этого метода является загрязнение пористой стенки, что серьезно снижает эффективность охлаждения. Тем не менее известны по крайней мере три патента, посвященные конструкциям лопаток с транспирационным охлаждением [8–10].

В последнее время авиадвигателестроительные фирмы в США и Великобритании разрабатывают новые высокоэффективно охлаждаемые конструкции лопаток для ГТД с температурой газа на входе в турбину $T_1 > 2000$ К. Основная идея состоит в создании дополнительного контура охлаждения непосредственно в стенках лопатки – так называемая двустенная лопатка с инжекционным охлаждением. Существует множество схем инжекционного охлаждения и практическая реализация каждой из них определяется лишь технологическими возможностями изготовления двустенных лопаток. Следует отметить, что во всех случаях используется комбинированное охлаждение, т. е. сочетание конвективно-пленочного с инжекционным охлаждением в стенках лопатки.

Двустенное охлаждение, разработанное вначале фирмой Rolls-Royce для охлаждения стенок

камеры сгорания, по своей эффективности занимает промежуточное положение между транспирационным и конвективно-пленочным.

В Европе и США разработано множество схем двустенного охлаждения с различными названиями: Transply, CastCool, Lamilloy, SuperCool, Dual-wall cooling. На рис. 1 схематически показано несколько вариантов направления воздушных потоков в двустенных лопатках.

1. Пленочное охлаждение (Film cooling).
2. Инжекционное охлаждение осуществляется путем столкновения воздушных струй с горячей стенкой (Impingement cooling, Dual-wall cooling).
3. Эффузионное охлаждение происходит за счет медленного истечения хладагента через отверстия в горячей стенке (Effusion cooling).
4. Транспирационное охлаждение осуществляется просачиванием хладагента через пористую стенку (Transpiration cooling).
5. Трансплай – сочетание инжекционного с кон-

вективно-пленочным охлаждением (Transply cooling).

6. Ламиллой является стандартной технологией, используемой фирмой Rolls-Royce (Lamilloy®).

В результате проведения НИОКР за период 1997–2006 гг. в ВИАМ и ЦИАМ были получены патенты на конструкции лопаток с двойными стенками: «Полая лопатка „Вихрепор”» (1997 г.) – совместно с МВТУ им. Н.Э. Баумана [11] и «Охлаждаемая лопатка турбины» (2006 г.) – совместно с ЦИАМ [12].

Патентно-технические исследования уровня технологий изготовления двустенных лопаток показали, что за последние 10 лет появилось свыше 40 патентов, в которых предложены различные схемы периферийного контура охлаждения. Наибольшие трудности при практической реализации этих схем связаны с технологией изготовления периферийного контура в тонких стенках лопаток. В настоящее время существуют три

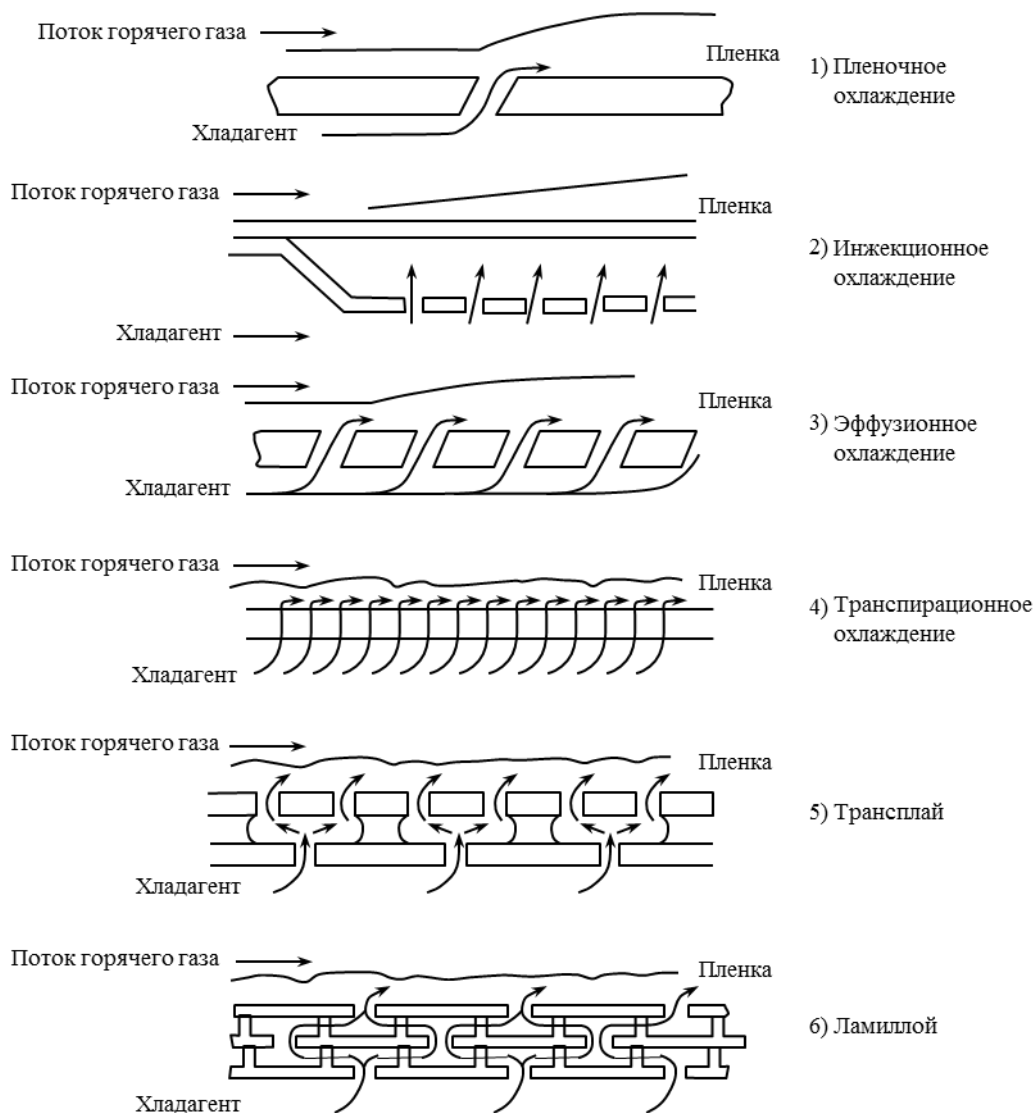


Рис. 1. Схемы направления воздушных потоков в двустенных лопатках

различных метода оформления таких контуров охлаждения в стенках лопаток с помощью:

- составных керамических стержней;
- составных гибридных стержней с использованием тугоплавких металлов;
- изготовления двустенных лопаток методом сварки или пайки.

В данном обзоре основное внимание будет обращено на конструкцию лопаток с двойными стенками и технологию изготовления центрального и периферийного контуров охлаждения таких лопаток.

1. Изготовление составных стержней с использованием керамической массы из смеси огнеупорных порошков электрокорунда

Конструкция лопатки с двойной стенкой, предложенная в патенте ВИАМ и ЦИАМ, показана на рис. 2 [13]. Охлаждающий воздух подается непосредственно в центральную раздаточную полость, а затем через отверстия поступает в радиальные каналы в холодной внутренней стенке лопатки. При такой циркуляции воздуха охлаждение осуществляется двумя способами: в результате теплообмена при соударении воздушных струй с внутренней поверхностью горячей стенки и при просачивании воздуха на внешнюю горячую поверхность с образованием защитной пленки. В патенте описана конструкция и способ изготовления составного керамического стержня, который формирует центральную и периферийную системы охлаждения этой лопатки (рис. 3). Составной стержень состоит из основного стержня и скрепленных с ним мини-стержней в виде трапециевидальной рамки с продольной перегородкой 1, которая с двух сторон соединена перемычками 2 с

боковыми стенками рамки, при этом оси перемычек смещены одна относительно другой, а крепление мини-стержней с основным стержнем осуществляется соединением в шлицевых пазах. Основной стержень, формирующий центральную охлаждающую полость лопатки, изготавливают прессованием керамической массы по штатной технологии. Дополнительные мини-стержни также прессуют по той же технологии.

На рис. 4 приведены фотографии составного керамического стержня со стороны спинки и корыта (а) с установленными в нем мини-стержнями в виде трапециевидальной рамки; фотография модельной двустенной лопатки в разрезе (б) – стрелками указано направление воздушного потока из центральной полости через отверстия во внутренней стенке в радиальные каналы, а затем через перфорационные отверстия выход на внешнюю горячую поверхность и образование защитной пленки; фотографии общего вида лопаток со стороны корыта и спинки (в).

Соединение мини-стержней с основным стержнем осуществляется методом склеивания в шлицевых пазах. Основным недостатком этой конструкции состоит в том, что в промышленных условиях невозможно изготовить составные керамические стержни высокого класса размерной точности методом склеивания. Ручная установка дополнительных мини-стержней в шлицевых пазах не обеспечивает стабильность заданной геометрической формы и чистоты поверхности даже при использовании специальных кондукторов. При несоответствии размерной точности и чистоты поверхности литой лопатки требованиям чертежа необходимо вводить значительные припуски на механическую

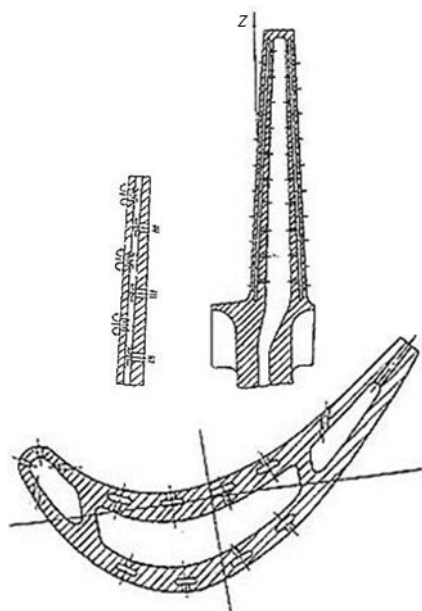


Рис. 2. Поперечное и продольное сечение рабочей лопатки конструкции ВИАМ–ЦИАМ

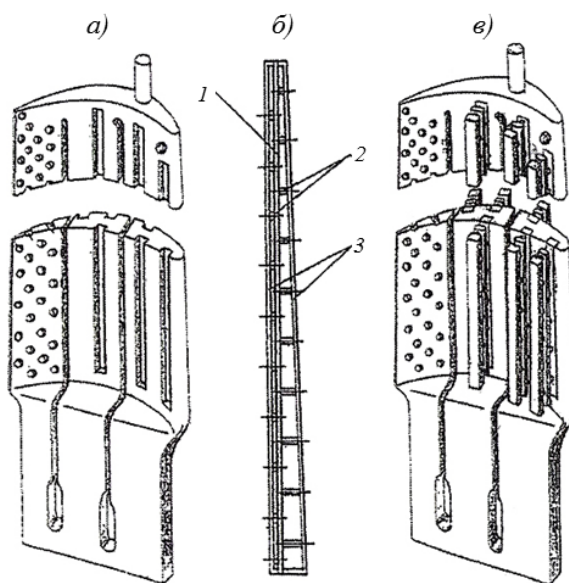


Рис. 3. Конструкция основного стержня (а), мини-стержня (б: 1, 2, 3 – соответственно перегородка, перемычки и боковые стенки рамки-стержня) и составного стержня (в)



Рис. 4. Составной керамический стержень (а), модельная двустенная лопатка в разрезе (б) и общий вид со стороны корыта и спинки (в)

обработку. Введение таких припусков увеличивает трудоемкость обработки и делает предложенный способ не рентабельным в серийном производстве.

Поэтому в патенте ВИАМ [14] предложен другой способ изготовления составных керамических стержней, который исключает ручную операцию установки дополнительных мини-стержней и их клеевое крепление с основным стержнем в шлицах. На рис. 5 схематически изображена пресс-форма для изготовления промежуточной модели из

двух секторов. Пресс-форма состоит из металлической матрицы 1 и сердечника 4. Профильные поверхности матрицы повторяют часть внешнего обвода лопатки со стороны спинки и корыта, а обводы сердечника соответствуют форме основного стержня. На поверхностях сердечника и матрицы выполнены продольные пазы треугольной формы. В собранном виде между профильными поверхностями матрицы и сердечника образуются щелевые полости, поперечный размер которых равен толщине стенки лопатки.

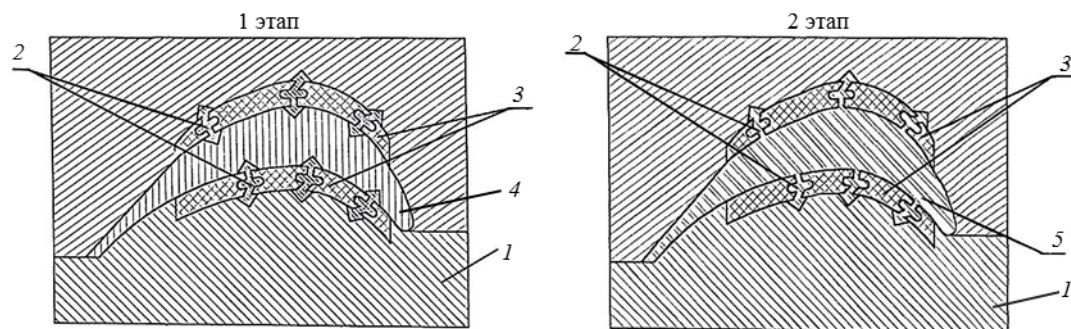


Рис. 5. Схема пресс-формы для изготовления промежуточной модели двух секторов:
1 – матрица; 2 – обожженные мини-стержни; 3 – промежуточные растворяемые секторы; 4 – сердечник;
5 – основной стержень

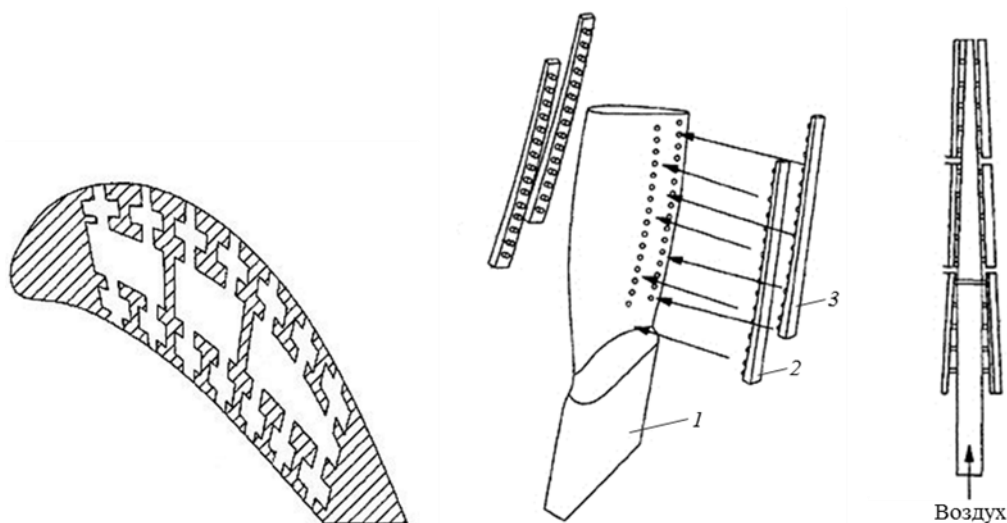


Рис. 6. Конструкция составного стержня:
1 – центральный стержень; 2 и 3 – дополнительные стержни

На первом этапе предварительно изготовленные и обожженные дополнительные мини-стержни 2 рамочной конструкции вставляют в треугольные пазы матрицы и сердечника, а затем щелевую полость заполняют вымываемой модельной массой, например мочевиной. Затем модельные пресс-формы разбирают и снимают секторы 3.

На втором этапе секторы 3 переносят в стержневую пресс-форму и в центральную полость запрессовывают керамическую массу, которая обволакивает выступающие стенки дополнительных мини-стержней и тем самым обеспечивается надежная и прочная заделка последних в тело основного стержня 5. Таким образом, в ходе одной операции прессования основного стержня достигается монолитное соединение с дополнительными мини-стержнями и при этом гарантируется высокая точность их позиционирования как по высоте, так и по углу к профильной поверхности основного стержня.

После разборки стержневой пресс-формы промежуточную модель из мочевины вымывают, а затем составной стержень обжигают. Поскольку

основной и дополнительные стержни изготовлены из одинаковой керамической массы, то они совместимы по температурным коэффициентам линейного расширения (ТКЛР) и линейной усадке, поэтому в процессе высокотемпературного отжига отсутствует коробление мини-стержней.

Конструкция дополнительных мини-стержней и их монолитная заделка в основной стержень обеспечивает строгую фиксацию последнего в полости оболочковой формы и гарантирует постоянство толщины стенки по всему периметру литой детали.

Три патента ВИАМ посвящены конструкциям охлаждаемой лопатки турбины и составного керамического стержня для изготовления такой лопатки [15–17].

В патенте США [18] 2010 г. периферийный контур охлаждения в стенке лопатки формируется закладными керамическими элементами, близкими по конструкции к тем, которые описаны ранее в патенте ВИАМ в 1995 г., т. е. на 15 лет раньше [13]. Конструкция составного керамического стержня и процесс его сборки показаны на рис. 6.

2. Изготовление составных стержней с использованием керамополимерных пленок

В патентах ВИАМ [19, 20] описан оригинальный способ изготовления составных стержней, включающий получение основного стержня и изготовление дополнительного тонкостенного стержня из гибкой керамополимерной пленки, состоящей из смеси порошков электрокорунда и полимерного связующего. Благодаря высокой эластичности такие пленки толщиной 0,5–0,6 мм можно прокатывать и формовать по пространственным криволинейным профилям, предварительно создав на поверхности разнообразный рельеф.

Последовательность технологических операций изготовления составных стержней с использованием гибких керамополимерных пленок следующая.

На первом этапе изготавливают основной стержень по общепринятой технологии, включающей изготовление керамической массы из смеси огнеупорных порошков корунда заданного гранулометрического состава, термопластификацию указанной смеси сплавом парафина с полиэтиленом при температуре 150–160°C, прессование полученной керамической массы в расплавленном состоянии в металлической форме и обжиг в засыпке глинозема при температуре 1350–1400°C.

Дополнительный стержень изготавливают в две стадии. Вначале методом прокатки получают гладкую ленту из смеси огнеупорных порошков и полимерного связующего. Минимальная толщина ленты составляет 0,5–0,6 мм, длина и ширина ленты регламентируются размерами прокатных валков. Физико-механические свойства регулируются подбором соответствующего связующего и объемным наполнением порошков корунда. Далее на поверхность ленты прокаткой в фигурных валках наносят двусторонний рельеф, затем ленту раскра-

ивают на заготовки и профилируют необожженные заготовки по контуру лопатки (рис. 7).

В процессе совместного высокотемпературного обжига основного стержня и соединенной с ним заготовки происходит выгорание связующего, спекание порошковых частиц и превращение заготовки в керамический дополнительный стержень. При обжиге происходит также спекание дополнительного стержня с основным – в местах контактов элементов рельефа с поверхностью последнего. Прочное соединение возможно только в том случае, если значения ТКЛР и усадки обоих элементов составного стержня одинаковы. Обжиг следует проводить в керамическом драйере для обеспечения стабильности размеров и формы составного стержня.

3. Изготовление составных гибридных стержней с использованием тугоплавких металлов

Рассмотренные ранее составные стержни изготавливают из керамических масс, содержащих порошки электрокорунда, полимерные связующие, термопластификаторы и спекающие добавки. Вследствие хрупкой природы и низкой прочности керамики очень трудно, а иногда и просто невозможно, изготовить тонкие дополнительные стержни, формирующие периферийную систему охлаждения в стенках лопатки толщиной $\leq 0,5$ мм. Весьма часто в процессе высокотемпературного обжига происходит коробление тонкостенных стержней, а при заливке металла наблюдается выход стержней на внешнюю поверхность лопатки, либо поломка стержня. Все это приводит к низкому выходу годного при промышленном производстве двустенных лопаток. За последнее десятилетие разработаны технологии изготовления

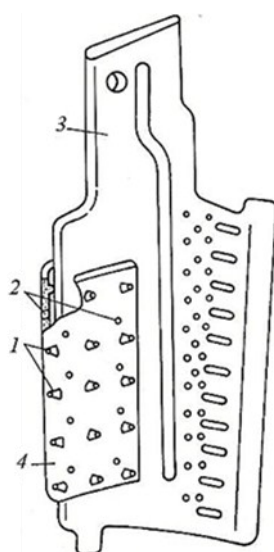


Рис. 7. Составной керамический стержень:

1 – штырьки; 2 – отверстия; 3 – основной стержень; 4 – дополнительный стержень, изготовленный из керамической пленки

составных гибридных стержней с использованием тугоплавких металлов, в частности молибдена и его сплавов.

Основные задачи, решение которых нужно было найти при разработке технологии изготовления гибридных стержней, состояли в следующем:

- повысить механическую прочность тонкостенных элементов составных стержней, формирующих периферийную систему охлаждения в стенках лопаток;
- увеличить сопротивление термическому удару струи расплава при заливке металла;
- получить криволинейные пространственные профили более простой операцией штамповки металлической заготовки вместо прессования керамических масс в сложных пресс-формах с последующим высокотемпературным обжигом.

Как и прежде, основные стержни изготавливают из стандартных керамических масс по штатной технологии, а дополнительные стержни – из тугоплавких металлов и их сплавов (молибдена, тантала, ниобия, вольфрама). По сравнению с керамикой тугоплавкие металлы обладают высокой прочностью и достаточной пластичностью, что позволяет относительно просто манипулировать с ними на последующих этапах технологического процесса. Недостатком тугоплавких металлов является низкая жаростойкость. Для защиты от окисления при высокотемпературном обжиге керамических оболочковых форм, а также от эрозионного воздействия расплава жаропрочного сплава при литье лопаток, на дополнительные стержни из тугоплавких материалов наносят защитные покрытия. Преимущество таких стержней из тугоплавких металлов заключается также в том, что их можно изготавливать из проволоки, прокатанных листов или фольги толщиной от нескольких десятков микрон до 0,3–0,5 мм. Кроме того, такие стержни легко штампуются конформно криволинейному профилю лопатки. Приоритет в разработке технологии изготовления составных гибридных стержней принадлежит американской фирме United Technology Corporation, которая за период 1995–2010 гг. получила более 15 патентов, содержащих описание конструкций двустенных лопаток и технологии изготовления гибридных стержней для формирования периферийных микроконтуров охлаждения [21–27].

В качестве примера на рис. 8 показано поперечное сечение рабочей лопатки, в которой охлаждение осуществляется в двух контурах [22]. В центральной полости 1 охлаждение происходит по традиционной петлевой (серпантинной) схеме. В периферийных микроконтурах 2 и 3 в стенках лопатки охлаждение также организовано по петлевой схеме. На рис. 9, а дано вертикальное сечение микроконтура со стороны корыта. Охлаждение воздухом микроконтура осуществляется из центральной полости через одно (или несколько) щелевых отверстий в канале. Далее воздушный поток делает петлю и течет по промежуточному каналу, а затем

поступает в выходной канал и выбрасывается на поверхность лопатки через одно или несколько отверстий. Во входном канале можно сформировать интенсификаторы теплообмена в виде штырьков, лунок, полуребер. Аналогичное строение имеет микроконтур со стороны спинки (рис. 9, б). Движение воздушного потока здесь организовано также по петлевой схеме. Из центральной полости воздух попадает во входной канал через щелевое отверстие. Затем делает две петли и выбрасывается на спинку лопатки через отверстие.

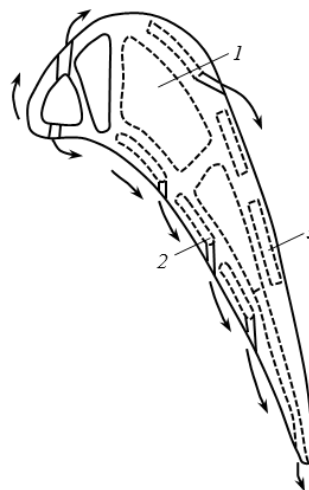


Рис. 8. Поперечное сечение двустенной лопатки: 1 – центральная полость; 2 и 3 – периферийные микроконтур

На рис. 9, б показан чертеж стержня из молибденового листа, с помощью которого формируется периферийная система охлаждения по серпантинной схеме. Лапки формируют входные и выходные щелевые отверстия. Выходные лапки можно отогнуть под любым углом и тем самым обеспечить выход воздушной струи под оптимальным углом для покрытия внешней поверхности лопатки воздушной пеленой.

В патенте ЦИАМ [12] предложено использовать петлевую схему охлаждения в радиальных каналах периферийного микроконтура лопатки. Следует отметить, что идея использования петлевой схемы охлаждения в стенках лопатки была предложена ЦИАМ значительно раньше (приоритет 21 мая 2004 г.), чем это описано в патенте фирмы United Technology Corporation (приоритет от 8 ноября 2005 г.) [21]. Конструктивные решения реализации этой идеи в патентах различные.

На рис. 10 показаны поперечное и продольное сечение двустенной лопатки конструкции ЦИАМ. Охлаждаемая лопатка содержит центральную полость 1, щелевые периферийные полости в стенках лопатки 2, которые продольными перегородками 3 разбиты на несколько соединяющихся между собой каналов 4 и 5. Канал 4 щелевой полости 2

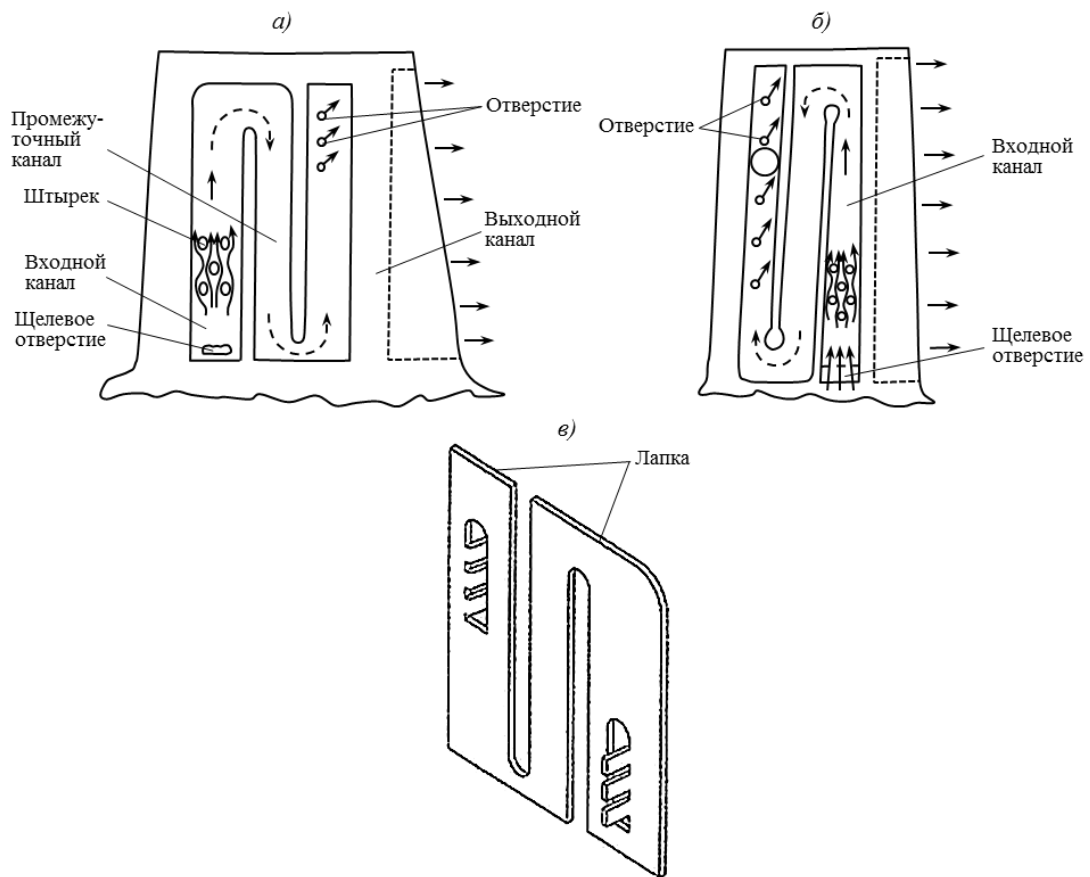


Рис. 9. Петлевая схема охлаждения в микроконтуре:
 а – со стороны корыта; б – со стороны спинки; в – молибденовый микростержень

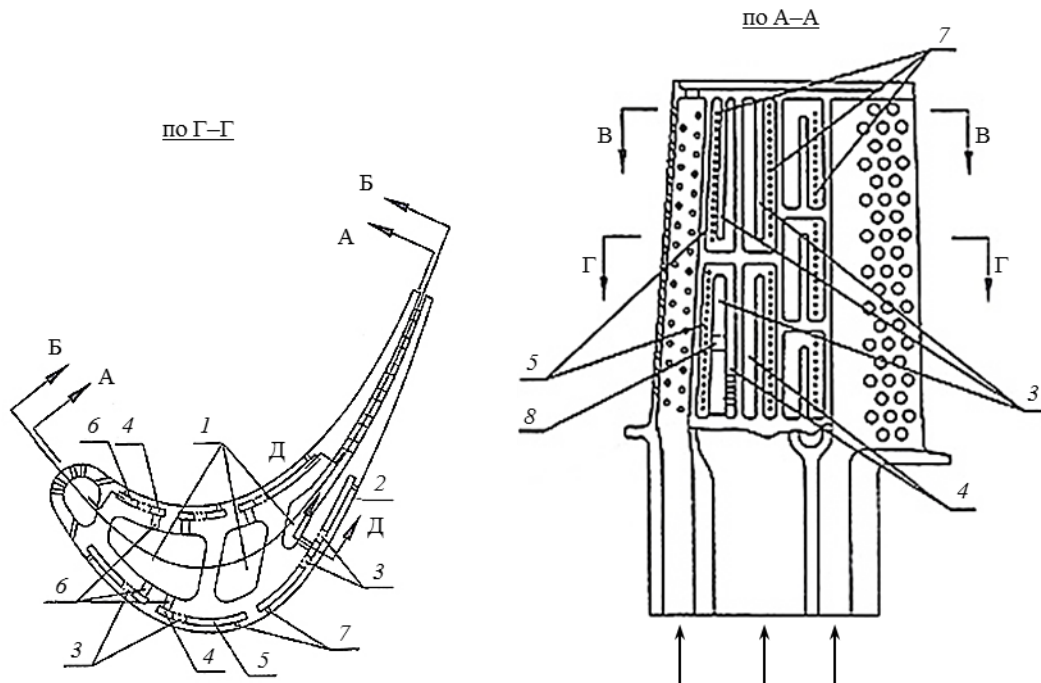


Рис. 10. Поперечное сечение лопатки Г-Г (а) и продольный разрез лопатки А-А (б):
 1 – центральная полость; 2 – щелевые периферийные полости в стенках лопатки; 3 – перегородки; 4 и 5 – каналы; 6, 7 и 8 – отверстия

отверстиями 6 соединен с центральной полостью 1, а канал 5 той же щелевой полости 2 отверстиями 7 соединен с внешней поверхностью лопатки. Перегородки 3 в щелевой полости 2 выполняются с постоянной или переменной толщиной по длине канала с различным углом по отношению к оси лопатки. В перегородках могут быть выполнены отверстия 8, соединяющие смежные каналы 4 и 5.

Охлаждение лопатки осуществляется следующим образом. Воздух из центральной полости 1 через отверстия 6 поступает в канал 4 щелевой полости 2. Затем из канала 4 воздух, поворачивая вокруг перегородки 3 или протекая через отверстие 8, поступает в канал 5, из которого вытекает через отверстие 7 в стенке канала 5 на поверхность лопатки.

Для оптимизации распределения воздушного потока по поверхности лопатки в условиях изменения давления газа по ширине хорды h и длине лопатки l с учетом влияния сил Корриолиса необходимо, чтобы отношение $l/h \approx 1$. Если $l/h > 2-3$, то следует организовать два расположенных друг под другом микроконтура охлаждения со стороны спинки и со стороны корыта – как это предложено в патенте ЦИАМ [12].

До сих пор рассматривались способы формирования периферийных микроконтуров охлаждения в стенках лопатки со стороны корыта и спинки. В патенте [27] описана технология изготовления стержней из тугоплавких металлов для формирования криволинейных выпускных каналов на входной кромке лопаток.

В патенте [24] приведены составы покрытий на молибденовых стержнях и способ их удаления из отливки. Вначале на молибденовый стержень химическим осаждением из пара наносят соединительный слой нитрида алюминия толщиной 3–5 мкм. Далее методом CVD, PVD или иным способом наносят защитное покрытие из оксида алюминия толщиной 15–25 мкм. Нитрид алюминия удаляется в щелочах КОН или NaOH, а молибденовый стержень легко растворяется в водных растворах серной и азотной кислот при температурах 60–100°C, либо в горячей соляной кислоте или царской водке.

4. Изготовление двустенных лопаток методом сварки или пайки

В 2010 г. крупнейшие авиационные фирмы (Boing, GE, Honeywell, Pratt and Whitney, Rolls-Royce) разработали программу FAA Continuous Lower Energy, Emission & Noise (CLEEN) Technologies, предусматривающую разработку технологий, снижающих эмиссию, шум и расход топлива. Одна из целей, которую преследовала фирма Rolls-Royce, состояла в разработке, изготовлении и испытании двустенных рабочих и сопловых лопаток для высокотемпературных двигателей гражданского назначения. Последнее обстоятельство особенно важно подчеркнуть, так как до настоящего време-

ни высокая стоимость производства таких лопаток была ограничена применением в ГТД военного назначения. Разработанные технологии производства рабочих и сопловых лопаток имеют торговые марки Rolls-Royce Lean Cool™ blade technology и Rolls-Royce Cast Bond™ turbine vanes technology соответственно. Эти технологии объединяют перспективную схему охлаждения и литье, обеспечивающее формирование сложной внутренней геометрической формы лопатки.

За период 2010–2012 гг. были завершены разработка конструкции рабочей лопатки с двойной стенкой, ее изготовление и испытание на стенде Lean Cool (частотные характеристики, малоцикловая усталость).

Используя накопленный опыт быстрого прототипирования были изготовлены сопловые турбинные лопатки по технологии Cast Bond.

Лопатки с двумя стенками изготавливают путем соединения сваркой или пайкой наружной оболочки и силового лонжерона, получаемых литьем или любым иным способом. При этом комбинация используемых материалов может быть различной. Для определения физической и механической совместности различных материалов, а также прочности сварных (паяных) швов необходимо провести испытания лопаток с двойными стенками. Однако испытания на стендах полноразмерных двустенных лопаток весьма дорогостоящая процедура. Поэтому в патенте [28] предлагается конструкция двустенного образца, изготовленного путем сварки и моделирующего аэродинамический профиль лопатки. С помощью такого двустенного образца можно определить его механические, термомеханические и усталостные характеристики. На рис. 11 приведен чертеж такого образца. Образец имеет силовой лонжерон 1, цилиндрическую оболочку 2, выступы 3 и места соединения диффузионной сваркой 4. В процессе высокотемпературных испытаний образец охлаждается пропускаемым воздухом через центральный канал. Далее воздушный поток через отверстия 5 попадает в щелевидную полость 6. Здесь охлаждение осуществляется путем соударения воздушных струй с внутренней стенкой оболочки 2. Затем воздух через отверстия 7 вытекает на внешнюю горячую стенку оболочки и образует защитную пленку.

ВИАМ и ЦИАМ имеют ограниченный опыт отработки процесса высокотемпературной пайки при изготовлении имитаторов двустенных лопаток турбины. Выбран припой для высокотемпературной пайки монокристаллического жаропрочного сплава ЖС32. Исследовано влияние различных способов механической обработки соединяемых поверхностей сплава на микроструктуру и характер формирования паяных соединений. Исследовано влияние величин зазоров и режимов высокотемпературной пайки на структуру паяных соединений. Отработан режим высокотемпературной пайки сплава ЖС32, обеспечивающий длительную

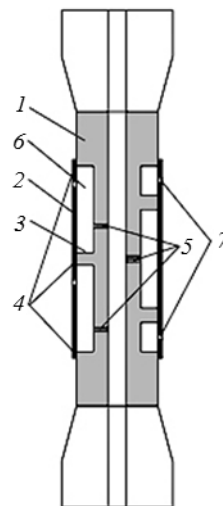


Рис. 11. Чертеж двустенного образца, изготовленного диффузионной сваркой:
 1 – силовой лонжерон; 2 – цилиндрическая оболочка; 3 – выступ; 4 – соединения диффузионной сваркой; 6 – щелевидная полость; 5 и 7 – отверстия

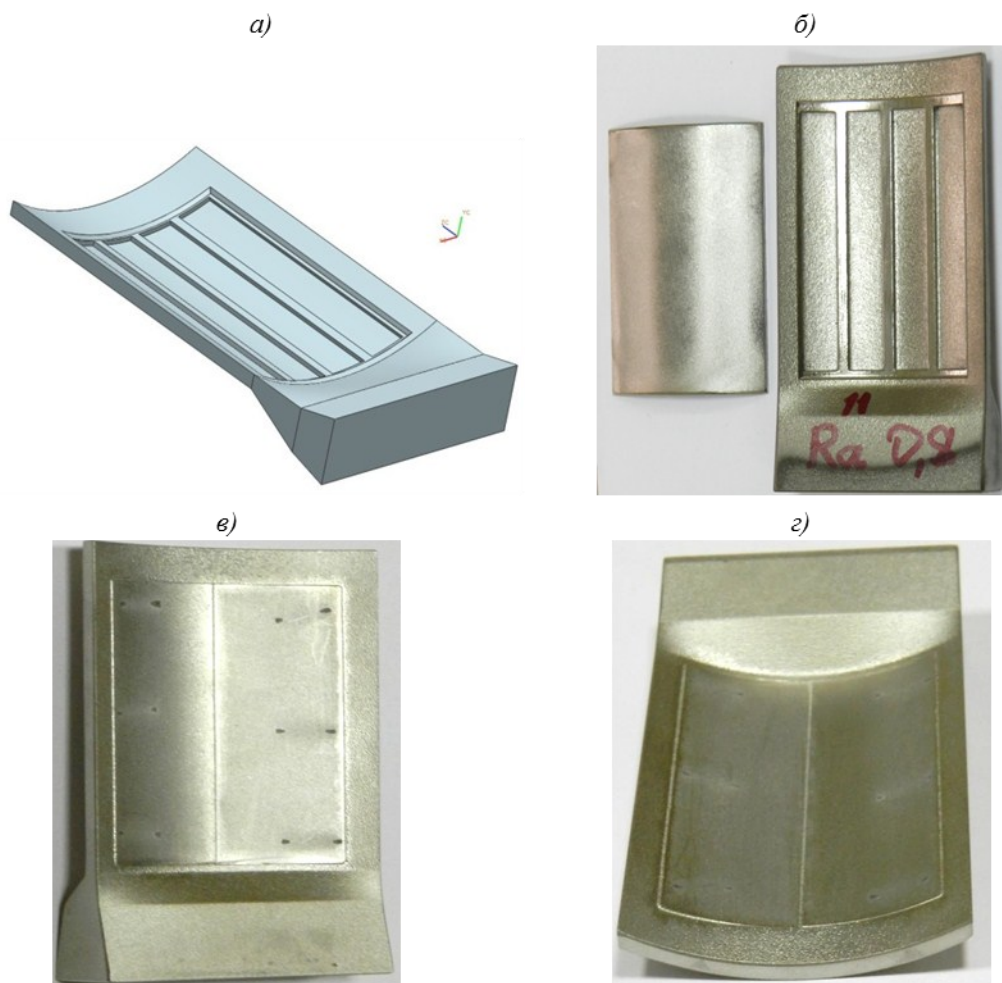


Рис. 12. Стадии изготовления образца-имитатора двустенной лопатки методом пайки:
 а – модель полости со стороны корыта в имитаторе лопатки; б – крышка и полость в корыте имитатора лопатки с ребрами жесткости; в и г – имитаторы лопаток после пайки

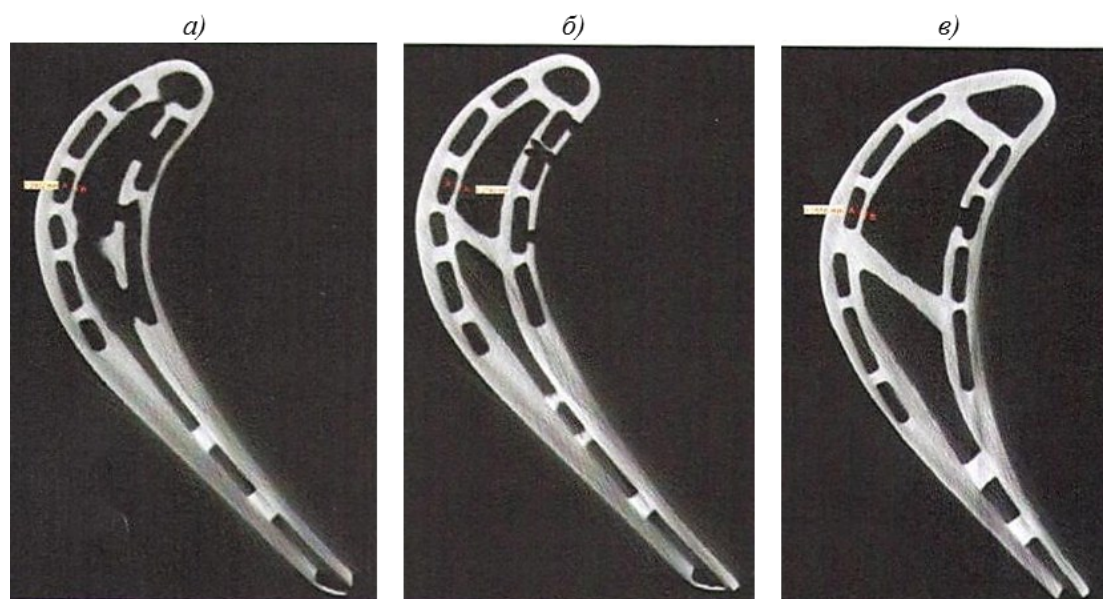


Рис. 13. Поперечные сечения двустенной лопатки при смещении по высоте Z с замерами толщины стенки:
 $a - Z=56,25$ мм, толщина стенки 0,29 мм; $b - Z=52,65$ мм, толщина стенки 0,27 мм; $c - Z=12,25$ мм, толщина стенки 0,355 мм

(сточасовую) прочность паяного соединения при температурах 900; 1000 и 1100°C на уровне не менее 0,5–0,6 от прочности основного материала. Проведена высокотемпературная пайка образцов из сплава ЖС32 и образцов-имитаторов лопатки. На рис. 12 приведена схема изготовления образца-имитатора двустенной лопатки методом пайки из сплава ЖС32. При таком методе изготовления двустенных лопаток чрезвычайно важен контроль паяных соединений. В совместной работе ВИАМ и НИАТ методом рентгеновской компьютерной томографии проведена оценка геометрической формы и толщины тонких стенок лопаток, а также дефектов структуры. Последовательный просмотр поперечных сечений при смещении по высоте лопатки позволил проконтролировать смещение стержней в процессе литья и оценить толщину внутренних стенок готовых лопаток. На рис. 13 приведены снимки, полученные методом рентгеновской компьютерной томографии, с замерами толщин внутренней стенки на различной высоте по оси Z двустенной лопатки.

Заключения

Основное преимущество двустенных лопаток заключается в уменьшении расхода воздуха на охлаждение лопаток за счет более развитой поверхности охлаждения. По оценкам ЦИАМ эта разница составляет 20–30%, а по зарубежным более оптимистическим оценкам расход воздуха снижается на 50%. Кроме того, оптимально спроектированная двустенная лопатка будет легче лопатки с

конвективно-пленочным охлаждением при одинаковых габаритах – как это следует из результатов численного моделирования ЦИАМ. Следует также отметить снижение на 50% температурного градиента напряжений в стенках лопаток, что, в свою очередь, оказывает положительное влияние на ресурс лопаток.

Фирма Rolls-Royce запатентовала высокоэффективную схему охлаждения в двустенных лопатках и производит такие лопатки из монокристаллического сплава CMSX-4, что позволило достичь глубины охлаждения $\theta \approx 0,8$.

Рабочие лопатки ТВД самого большого и мощного перспективного двигателя ТРДД GE 9X для самолета B777X изготовлены с использованием нового технологического процесса, с усовершенствованным контуром охлаждения. Английская фирма Rolls-Royce в перспективном гражданском двигателе Trent XWB будет использовать двустенные рабочие и сопловые лопатки, изготовленные по технологиям Rolls-Royce Lean Cool™ blade technology и Rolls-Royce Cast Bond™ turbine vanes technology.

Рассмотренные в данном обзоре работы могут быть использованы в рамках реализации комплексного научного направления 9.6. «Технологии изготовления лопаток ГТД с высокоэффективным охлаждением, включая керамические формы и стержни для лопаток из новых перспективных сплавов» («Стратегические направления развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года») [6].

ЛИТЕРАТУРА

1. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л. Компьютерное конструирование жаропрочного никелевого сплава IV поколения для монокристаллических лопаток газовых турбин // Литейные жаропрочные сплавы. Эффект С.Т. Кишкина. М.: Наука. 2006. С. 98–115.
2. Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М. Литейные жаропрочные сплавы нового поколения // 75 лет. Авиационные материалы. М.: ВИАМ. 2007. С. 27–44.
3. Герасимов В.В., Петрушин Н.В., Висик Е.М. Усовершенствование состава и разработка технологии литья монокристаллических лопаток из жаропрочного интерметаллидного сплава // Труды ВИАМ. 2015. №3. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 20.10.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-3-1-1.
4. Герасимов В.В. От монокристаллических неохлаждаемых лопаток к лопаткам турбин с проникающим (транспирационным) охлаждением, изготовленным по аддитивным технологиям (обзор по технологии литья монокристаллических лопаток ГТД) // Труды ВИАМ. 2016. №10. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 17.10.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2016-0-10-1-1.
5. Ечин А.Б., Бондаренко Ю.А. Особенности структуры и свойства никелевого монокристаллического жаропрочного сплава, полученного в условиях переменного температурного градиента на фронте роста // Труды ВИАМ. 2015. №8. Ст. 01. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 7.10.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2015-0-8-1-1.
6. Каблов Е.Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» // Авиационные материалы и технологии. 2015. №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.
7. Базылева О.А., Туренко Е.Ю., Шестаков А.В. Влияние термической обработки на микроструктуру и механические свойства сплава на основе интерметаллида NiAl // Труды ВИАМ. 2014. №9. Ст. 02. URL: <http://www.viam-works.ru> (дата обращения: 27.10.2016). DOI: 10.18577/2307-6046-2014-0-9-2-2.
8. Transpiration cooled blade for a gas turbine engine: пат. 4314794 США. №88245; заявл. 25.10.79; опубл. 9.02.82.
9. Method of manufacturing a transpiration cooled ceramic blade for a gas turbine: пат. 4376004 США. №197318; заявл. 15.10.80; опубл. 8.03.83.
10. Transpiration blade: пат. 7208104 Япония. №19940002270; заявл. 14.01.64; опубл. 08.08.95.
11. Полая лопатка «Вихрепор»: пат. 2078946 С1 Рос. Федерация. №94010180/06; заявл. 22.03.94; опубл. 10.05.97. Бюл. №13.
12. Охлаждаемая лопатка турбины: пат. 2267616 С1 Рос. Федерация. №2004115403/06; заявл. 21.05.04; опубл. 10.01.06. Бюл. №01.
13. Составной керамический стержень для литья полых охлаждаемых изделий: пат. 2090299 Рос. Федерация. №95114634; заявл. 14.08.95; опубл. 20.09.97. Бюл. №26.
14. Способ литья полых охлаждаемых изделий и литое полое охлаждаемое изделие: пат. 2252109 С1 Рос. Федерация. №2003127868/02; заявл. 16.09.03; опубл. 20.05.05. Бюл. №14.
15. Способ получения охлаждаемой лопатки газотурбинного двигателя и охлаждаемая лопатка газотурбинного двигателя: пат. 2094170 Рос. Федерация. №95121466/02; заявл. 28.12.95; опубл. 27.10.97. Бюл. №29.
16. Составной керамический стержень: пат. 2094163 Рос. Федерация. №95121467/02; заявл. 28.12.95; опубл. 27.10.97. Бюл. №29.
17. Охлаждаемая лопатка турбины и способ ее получения: пат. 2093304 Рос. Федерация. №95121468; заявл. 28.12.95; опубл. 20.10.97. Бюл. №29.
18. Impingement skin core cooling for gas turbine engine blade: пат. 7837441 В2 США. №11/707702; заявл. 16.02.07; опубл. 23.11.10.
19. Способ изготовления составного керамического стержня для литья полых изделий: пат. 2126308 Рос. Федерация. №98101354/02; заявл. 23.01.98; опубл. 20.02.99. Бюл. №5.
20. Способ изготовления составного керамического стержня для литья полых изделий: пат. 2319574 С1 Рос. Федерация. №2006124641/02; заявл. 11.07.06; опубл. 20.03.08. Бюл. №8.
21. Peripheral microcircuit serpentine cooling for turbine airfoil: пат. 2007/0104576 А1 США. №11/269030; заявл. 8.11.05; опубл. 10.05.07. Бюл. №18.
22. Microcircuit cooling for blades: пат. 1790822 А1 Европа. №06255972.9; заявл. 22.11.06; опубл. 30.05.07. Бюл. №22.
23. Microcircuit cooling with an aspect ration of unity: пат. 1813774 Европа. №20070250256; заявл. 23.01.07; опубл. 10.11.10. Бюл. №45.
24. Barrier coating system for refractory metal core: пат. 1788121 А2 Европа. №06255919.0; заявл. 20.11.06; опубл. 23.05.07. Бюл. №21.
25. Составной стержень для использования в прецизионном литье: пат. 2005125789 А Рос. Федерация. №2005125789/02; заявл. 15.08.05; опубл. 20.02.07. Бюл. №5.
26. Refractory metal core wall thickness control: пат. 2006/0118262 А1 США. №11/337293; заявл. 23.01.2006; опубл. 8.06.06.
27. Refractory metal core cooling technologies for curved leading edge slots: пат. 1790821 Европа. №20060255971; заявл. 22.11.06; опубл. 14.01.09.
28. Evaluation technique for bonded duel wall static and rotating Airfoil Materials: пат. 8215181 В1 США. №12/553,209; заявл. 3.09.09; опубл. 10.07.12. Rolls-Royce North American Technologies.