

## **Методология доводки теплонапряженных деталей газотурбинных двигателей**

**Викулин А.В.\*, Ярославцев Н.Л.\*\*, Земляная В.А.\*\*\***

*Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), МАИ, Волоколамское шоссе, 4, Москва, А-80, ГСП-3, 125993, Россия*

*\*e-mail: vav106@yandex.ru*

*\*\*e-mail: yaroslavcevn1@mai.ru*

*\*\*\*e-mail: chesnovava@mail.ru*

### **Аннотация**

Проведен анализ факторов, влияющих на точность оценки теплогидравлических характеристик высокотемпературных лопаток газотурбинного двигателя методом калориметрирования в жидкометаллическом термостате. Разработаны технологии теплового проектирования и диагностики охлаждаемых лопаток газовых турбин на стадии создания их первоначального проекта и последующей отработки базового варианта.

**Ключевые слова:** высокотемпературная газовая турбина, охлаждаемая лопатка, теплогидравлические характеристики, жидкометаллический термостат.

Перспективы развития газотурбинных двигателей (ГТД) и стационарных газотурбинных установок (ГТУ), связанные с повышением температуры газа перед

турбиной, предполагают организацию эффективного охлаждения деталей ее горячего тракта. Конструктивно-технологическая сложность охлаждаемых деталей турбины определяет большую продолжительность и высокие затраты этапа их доводки по сравнению с другими этапами разработки. При поиске оптимальной конструкции, прежде всего, используются численные модели теплового состояния охлаждаемой лопатки газовой турбины, согласно которым создается математическая модель физических процессов, протекающих в лопатке при ее эксплуатации. При этом точность аналитического решения зависит от полноты информации о граничных условиях теплообмена на внутренней и внешней поверхностях пера лопатки, достоверность которых во многом определяется сложностью ее конструкции. Поэтому расчетные методы базируются на результатах экспериментальных исследований, адекватность которых реальным условиям эксплуатации объекта определяет качество его конструирования.

В связи с этим, одной из основных проблем конструкторско-технологической доводки охлаждаемых деталей газовых турбин является разработка оперативных и высокоинформативных методов их теплового контроля.

Наиболее приемлемыми при проектировании и доводке охлаждаемых деталей газовой турбины являются статические методы испытаний, среди которых нашел широкое распространение метод калориметрирования в жидкометаллическом термостате благодаря технологической простоте, оперативности и высокой информативности.

Несмотря на некоторые допущения при проведении экспериментов по сравнению с реальными условиями эксплуатации лопаток, а именно, на замену

воздействия высокотемпературного газового потока на их поверхность подводом тепла от расплава металла, рассмотренный метод обладает высокой информативностью и не связан с большими производственными затратами [1].

Калориметрический метод теплового контроля охлаждаемых деталей горячего тракта ГТД и ГТУ позволяет:

- получить локальные и интегральные характеристики теплосъема по поверхности лопатки;

- определить значения тепловых потоков, коэффициентов теплоотдачи и теплопередачи, безразмерных коэффициентов Нуссельта или Стантона в зависимости от числа Рейнольдса в каждой точке пера лопатки;

- осуществлять доводку по тепловому состоянию охлаждаемых лопаток ГТД на всех этапах ее жизненного цикла: создание первоначального проекта базового варианта (модульная доводка), модернизация охлаждающего тракта лопатки с учетом особенностей опытного и мелкосерийного производства (технология имплантации), доводка конструктивного оформления охлаждающего тракта на этапе ее серийного изготовления с учетом технологических факторов производства (доработка керамического стержня);

- проводить оценку качества и стабильности технологического процесса изготовления лопаток в серийном производстве.

С целью повышения разрешающей способности метода, снижения экспериментальной погрешности до 5 – 7 % были решены следующие задачи:

- выполнено теоретическое исследование изменения температурного состояния рабочей среды термостата в процессе охлаждения на воздухе;
- исследована динамика образования металлограммы (корки «намороженного» металла) на охлаждаемой поверхности детали;
- определено влияния теплорасточков по твердой корке металла на разрешающую способность калориметрического метода испытаний;
- разработаны метод оценки эффективности пленочного охлаждения детали путем ее испытаний в расплаве кристаллизующегося металла и технология экспериментальной отработки конструкции охлаждаемых деталей по результатам их калориметрических испытаний.

Высокая информативность и оперативность при низких производственных затратах определяют целесообразность применения этого метода на различных этапах доводки детали, начиная с первоначального проекта, когда отсутствует выполненный в металле вариант детали, до корректировки конструкции детали для достижения требуемой по условиям производства технологичности.

Использование разработанных технологий позволяет экспериментально оценить не только общую работоспособность заложенной в проекте системы охлаждения, но и, что особенно важно, наметить пути совершенствования конструкции участков детали, не обеспечивающих проектные температурные параметры, то есть проводить доводку первоначального проекта детали, которая, как правило, связана с созданием модификаций, отличающихся друг от друга лишь конструктивным исполнением какого-либо участка детали.

Разработана поэтапная технология доводки по тепловому состоянию и технологичности охлаждаемых лопаток высокотемпературных газовых турбин (рис. 1).

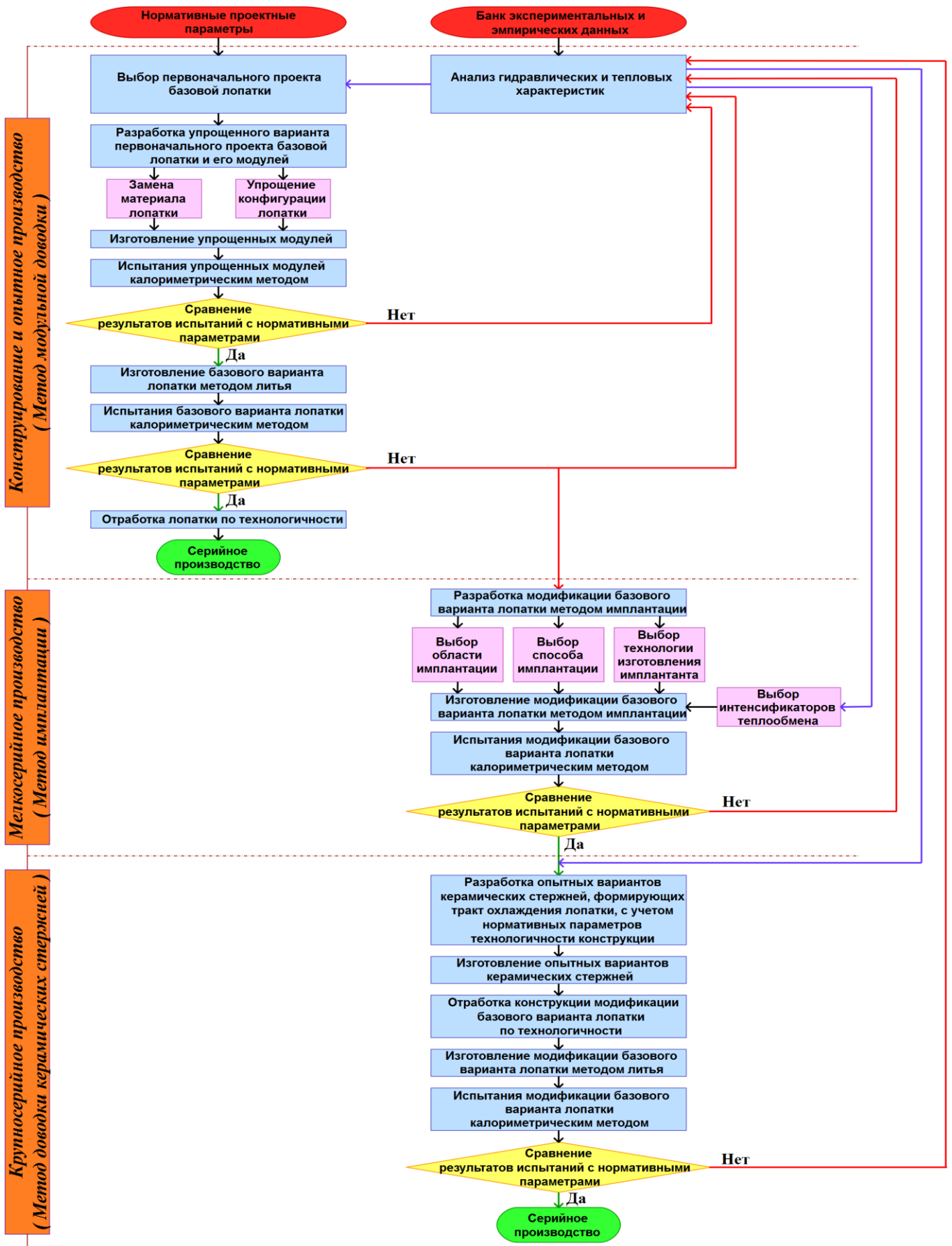


Рис. 1. Технология доводки охлаждаемых лопаток высокотемпературных газовых турбин по тепловому состоянию и технологичности

На начальной стадии создания проекта базовой конструкции проектируемой лопатки, когда заданы параметры ее эксплуатации (расходные характеристики и нормативные температурные характеристики по перу), на основании анализа банка экспериментальных данных и известных эмпирических зависимостей по теплообмену выбирается наиболее оптимальная система интенсификации теплообмена. Создается первоначальный вариант конструктивного исполнения охлаждающего тракта базовой лопатки, который представляется в виде упрощенных по конфигурации и материалу модулей, изготавливаемых на универсальном оборудовании (модульная доводка).

Далее на этапе отработки базового варианта конструкции лопатки при ее мелкосерийном производстве (разработаны и изготовлены штамп для производства керамических стержней, формирующих тракт охлаждения, и технологическая оснастка для процесса литья по выплавляемым моделям) целесообразно использовать технологию имплантации.

Для окончательной доводки лопатки газовой турбины по тепловому состоянию и технологичности в процессе серийного производства используется технология доработки керамических стержней, формирующих тракт охлаждения модификаций лопатки, с учетом нормативных параметров технологичности конструкции.

Рассмотрим более подробно каждый из указанных этапов создания оптимальной по конструкции и технологии изготовления охлаждаемой лопатки газовой турбины.

На этапе проектирования целесообразно изготавливать доводочные модификации лопатки на универсальном оборудовании, так как применение технологий серийного производства может повлечь за собой неоправданно большие расходы на подготовку производства. В частности, при изготовлении деталей методом литья по выплавляемым моделям необходимо изготовление специальной формы для прессования сложных фасонных стержней.

Следует отметить, что универсальное оборудование не всегда позволяет выполнить деталь в полном соответствии с проектом на приемлемом уровне затрат. Поэтому на ранней стадии проектирования испытывают обычно упрощенный, с точки зрения изготовления, вариант конструкции лопатки, а результаты корректируют с помощью критериев подобия, моделирующих режимные и геометрические характеристики детали в процессе эксплуатации с учетом граничных условий теплообмена [2].

Упрощенный вариант лопатки, подготовленный для калориметрических испытаний, может иметь существенные отклонения геометрии наружной поверхности и быть выполнен из более дешевого и легко обрабатываемого материала. Проведенные исследования показали, что сложные цилиндрические поверхности лопатки турбины могут быть заменены плоскими, а жаропрочный никелевый сплав ВЖМ-4 – более дешевой нержавеющей сталью 12Х18Н10Т [3]. На примере турбинной лопатки показано, что методика переноса результатов испытаний упрощенного варианта на натурную деталь позволяет оценить ее тепловое состояние с погрешностью, не превышающей 10 – 15 % [4].



Разработанная технология доводки деталей по тепловому состоянию на их упрощенных вариантах была использована при создании конструкции рабочей лопатки турбины с полупетлевой схемой течения охладителя двигателя АЛ-31ФП.

Интенсификация теплообмена во внутренней полости обеспечивалась сложным оребрением («вихревой матрицей»). Для разворота потока воздуха на периферии установлены ребра. Между направляющей перегородкой и матрицей расположен коллектор с крестообразным интенсификатором. Дополнительная подача воздуха в область за поворотным ребром осуществляется через два дроссельных отверстия в замковой части лопатки. На выходной кромке размещены наклонные перемычки (рис. 2). В качестве расчетного принят крейсерский режим работы двигателя, для которого характерны максимальные значения температуры пера лопатки.

Конструкция упрощенного варианта лопатки представлена на рис. 3. При этом входная кромка выполнялась в полном соответствии с проектными параметрами, а участки спинки и корыта в поперечном сечении имеют ромбовидный профиль.

Анализ конструкции упрощенного варианта лопатки показал, что ее целесообразно представлять в виде двух отдельных модулей, из которых первый включает в себя область входной кромки до разделительного ребра, а второй – область за разделительным ребром до выходной кромки. Разработанные модули были изготовлены из стали 12Х18Н10Т механической и электроэрозионной обработкой с последующим соединением отдельных элементов в единую конструкцию методом пайки высокотемпературным припоем.



Рис. 2. Конструкция внутренней полости базовой лопатки

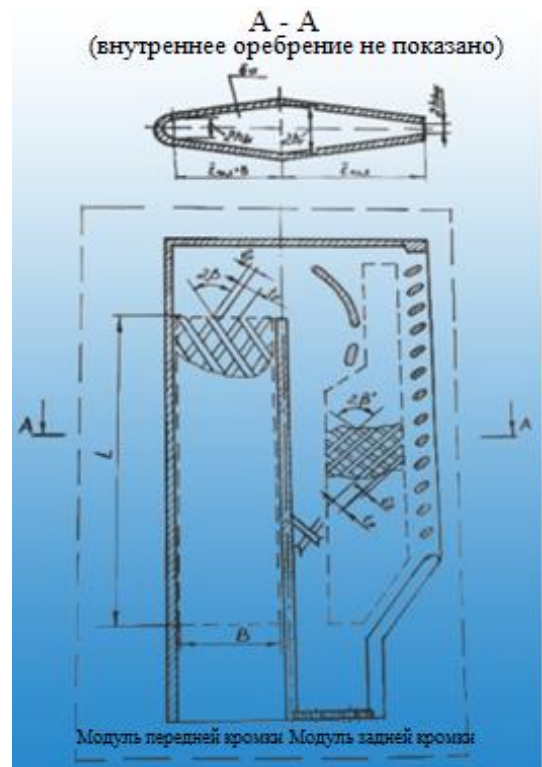


Рис. 3. Конструктивная схема упрощенного варианта лопатки

Испытания проводились в жидкометаллическом термостате при малой степени перегрева расплава цинка марки ЦВ0 и показали в передней полости лопатки уровень тепловых характеристик, не соответствующий нормативному распределению, поэтому дальнейшая модернизация конструкции проводилась для модуля входной кромки [5].

На основании проведенных исследований конструкции проектируемой лопатки были определены уточненные геометрические характеристики тракта охлаждения ее внутренней полости (варьирование угла наклона, шага и высоты ребер на смежных пластинах), которые должны обеспечить требуемый уровень охлаждения лопатки при заданных расходах охлаждающего воздуха и соответствующих им перепадах давления [6].

В соответствии с указанными конструктивными изменениями была изготовлена базовая лопатка, которая в дальнейшем также испытывалась в жидкометаллическом термостате. Результаты испытаний показали, что выполненные изменения конструкции привели к незначительному увеличению гидравлического сопротивления лопатки, но при этом были существенно улучшены ее тепловые характеристики, которые практически по всему обводу профиля соответствовали нормативным.

Следует отметить, что разработанная технология доводки позволяет получить вполне приемлемый по точности (отклонение до 10 %) результат для достаточно сложной конструкции тракта охлаждения такой детали, как лопатка с комбинированной схемой течения охладителя. Поэтому для более простых трактов охлаждения точность прогнозирования характеристик натурной детали по результатам калориметрических испытаний на ее упрощенных вариантах или модулях, несомненно, может быть еще выше.

На следующем этапе создания лопатки она передается в мелкосерийное производство, где осуществляется контроль ее теплового состояния. В случае несоответствия нормативным характеристикам на основании базы данных производится выбор оптимальных вариантов системы охлаждения и осуществляется математическое прогнозирование тепловых характеристик лопатки нового конструктивного исполнения. В этом случае модификация лопатки создается на основе базового варианта методом имплантации, который предусматривает удаление области лопатки, не удовлетворяющей нормативному распределению

тепловой нагрузки, изготовление и установку имплантанта, имеющего измененную конструкцию тракта охлаждения.

Технология имплантации на этапе доводки охлаждаемых деталей по тепловому состоянию была апробирована при разработке конструкции сопловой лопатки высокотемпературной турбины ГТД [7].

Сопловые лопатки турбины, несмотря на более высокую тепловую нагрузку, не испытывают воздействия центробежных сил, поэтому при повышении температурного режима работы турбины конструкция внутренней полости сопловой лопатки обычно претерпевает менее существенные изменения по сравнению с рабочей лопаткой. Это позволяет при разработке соплового аппарата турбины базироваться на его более ранних модификациях. В результате, доводка сопловой лопатки может начинаться с этапа, когда базовая лопатка изготовлена методом литья по выплавляемым моделям. В качестве объекта исследования была выбрана сопловая лопатка с короткими стержневыми ребрами (штырьками), схема которой представлена на рис. 4.

По заданному распределению тепловых источников внутри расчетной области (поперечные сечения лопатки и области, соответствующие цинковой корке) находится распределение тепловых потоков на границе теплообмена (граничные условия второго рода), являющееся контрольным параметром тепловых характеристик лопатки. Значения плотности теплового потока на поверхности лопатки сравниваются с нормативным распределением, полученным на базе проектных значений температуры газа, глубины охлаждения и параметров внешних граничных условий теплообмена со стороны газа.

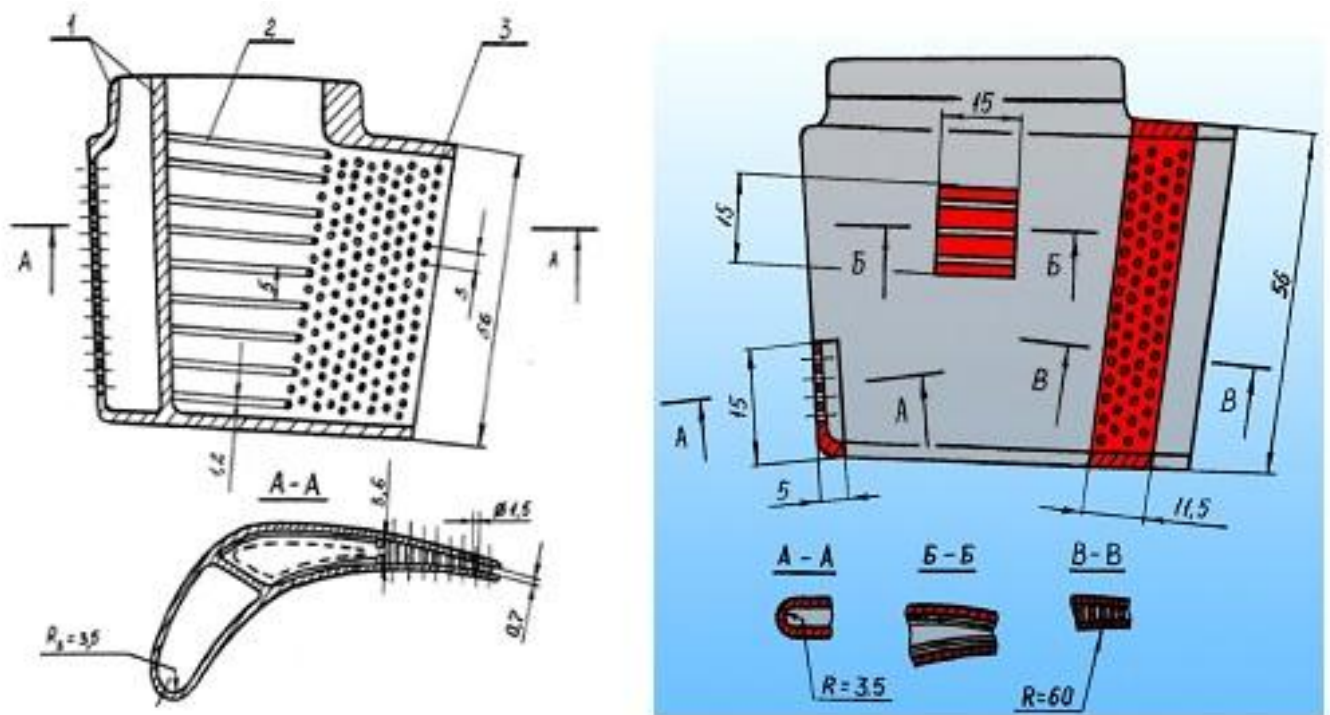


Рис. 4. Препарированная сопловая лопатка в базовом исполнении

В результате анализа результатов испытаний была установлена необходимость изменения конструкции участка выходной кромки лопатки. Сравнительно небольшая протяженность участка лопатки, требующего конструктивного изменения тракта охлаждения, а также наличие базовой лопатки, изготовленной методом литья, определило целесообразность применения при ее доводке технологии имплантации.

Для оценки влияния технологии имплантации при изготовлении модификации лопатки на ее теплогидравлические характеристики и выбора оптимального способа имплантации (рис. 5), со стороны спинки лопатки была удалена стенка с 4-мя рядами штырьков и заменена имплантантом, имеющим аналогичную удаленному участку конструкцию, но изготовленную по разработанной технологии.

Одновременно с этим исследовался вариант «сквозной» имплантации, при котором выходной щелевой канал фактически заменялся изготовленным модулем выходного участка лопатки (рис. 5).

Верификация метода имплантации осуществлялась следующим образом. Изготовленные варианты имплантированных лопаток с аналогичной системой интенсификаторов теплообмена испытывались калориметрическим методом на режимах, соответствующих испытаниям литой базовой лопатки, и сравнивались по гидравлическому сопротивлению и тепловым характеристикам с ней. Возникающие при таком сравнении отличия определяют точность воспроизведения теплообменных процессов в имплантированных модификациях лопатки и возможность использования метода имплантации при изготовлении доводочных объектов. При этом было отмечено, что оба типа имплантации практически не изменяют гидравлическое сопротивление лопатки (отличие не более 5 %), что положительно сказывается и на ее тепловых характеристиках, максимальное отличие которых от литой лопатки не превышает 6 – 8 %.

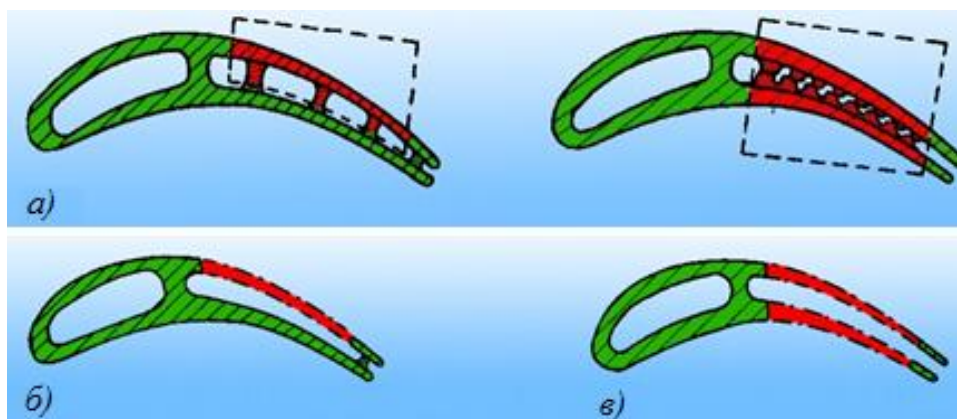


Рис. 5. Характерные типы имплантации базовой лопатки:

*а* – базовая лопатка с участками имплантации; *б* – имплантация со стороны спинки;

*в* – имплантация «сквозного» участка

На следующем этапе осуществлялось сопоставление результатов испытаний базовой лопатки с ее проектными теплогидравлическими характеристиками. Результаты выполненного анализа показали необходимость замены установленного типа интенсификаторов теплообмена на более эффективные комбинированные системы. Предварительный анализ литературных источников [4, 6, 8] показал, что более высокий уровень теплообмена по сравнению со штырьками наблюдается в «вихревых матрицах» и многорядных наклонных перемычках. Исследование теплогидравлических характеристик таких систем было выполнено по разработанной методике [9].

Модификация лопатки изготавливалась на основе базовой литой лопатки имплантацией со стороны спинки. Имплантант изготавливался из двух составных частей: стенки со стороны спинки, на которой формировались ребра «вихревой матрицы» и два ряда перемычек, и стенки со стороны корыта, на внутренней поверхности которой выполнялись только ребра «вихревой матрицы». После приработки торцевых поверхностей интенсификаторов первоначально соединялись стенки имплантанта, а затем он в сборе состыковался с неимплантированной частью базовой лопатки пайкой в вакуумной печи.

Испытания модификации лопатки, также как и базового варианта, проводились калориметрическим методом. При этом было установлено, что разработанная конструкция сопловой лопатки имеет пропускную способность, соответствующую заданной нормативной характеристике, а эффективность работы комбинированной системы охлаждения повысилась на 5 – 11 % по сравнению с

базовым вариантом [10]. Предложенные технические решения защищены авторскими свидетельствами на изобретение.

Создание модификаций лопаток, отличающихся конструкцией охлаждающих трактов, методом литья по выплавляемым моделям по обычной технологии связано с большими трудностями. Производство нового варианта пресс-формы для изготовления стержней является трудоемким и дорогостоящим процессом. Обычно новая пресс-форма изготавливается за 4-5 месяцев. Поэтому оперативно провести исследование ряда вариантов модифицированных лопаток затруднительно [11]. В связи с этим был разработан способ, позволяющий в широких пределах изменять конфигурацию охлаждающего тракта лопаток при их доводке в серийном производстве и получать небольшие партии модифицированных лопаток методом литья по известной технологии.

Предложенный способ состоит в доработке формы для прессования стержней, получении гладкого керамического стержня и придания на специальном оборудовании стержню требуемой конфигурации. Имеющиеся на форме выступы для формирования ребер и полуребер удаляются с помощью зубоврачебного бора с применением наждачных камней различных типов. Из формы так же удаляются плунжеры для формирования отверстий в стержне. Имеющиеся отверстия на обеих частях разъемной формы, предназначенные для плунжеров, заглушаются запрессовкой в них мягкой стальной проволоки. Оставшиеся после запрессовки концы проволоки механически удаляются так же, как и выступы на форме. Окончательная доводка поверхности производится шлифовальной шкуркой.



Далее по обычной технологии в полученной гладкой форме отформовываются стержни, и после обжига получается серия гладких керамических стержней.

Разработанное оборудование, предназначенное для доработки гладких стержней, позволяет перемещать бор в любую точку поверхности стержня и ориентировать его нормально к поверхности стержня. Стержень устанавливается на рабочий стол станины для доработки гладких стержней, и производится доработка стержня зубо-врачебными борами, частота вращения которых может достигать 10000 об/мин. Это дает возможность создавать на стержне обратный вид интенсификаторов теплообмена различной геометрии и формы (рис. 6).



Рис. 6. Доработка керамического стержня в серийном производстве

Получаемые таким образом стержни используются для литья лопаток с различными вариантами охлаждающих трактов. Технология получения литых лопаток с модифицированными стержнями ничем не отличается от известной технологии, используемой в серийном производстве.

Данный способ позволяет за короткий срок получать партию лопаток с новой конфигурацией охлаждающей полости. Способ открывает возможность оперативно оценивать тепловое состояние созданных модификаций лопаток и вносить изменения, направленные на совершенствование систем охлаждения лопаток.

При конструкторско-технологической доводке охлаждаемых деталей газовых турбин изделий 97, 99, 20 и др. были разработаны и исследованы в расплаве цинка следующие конструкции охлаждаемых деталей и элементов их охлаждающих трактов:

- рабочие лопатки турбины полупетлевой схемы со штырьковыми интенсификаторами теплообмена, ребрами и полуребрами, «флажками» и конфузорными каналами в передней полости;

- рабочие лопатки турбины полупетлевой схемы с «вихревой матрицей»;

- циклонно–вихревые рабочие лопатки турбины с несимметричной матрицей с разными углами наклона, протяженностью и количеством каналов и ребер на спинке и корыте лопатки;

- сопловые лопатки турбины дефлекторного типа со штырьковыми интенсификаторами теплообмена, «вихревыми матрицами», сочетающимися с многорядной системой наклонных перемычек;

- охлаждаемая полка секционного соплового аппарата, имеющая коробчатую форму, во внутренней полости щелевого канала которой установлены односторонние зигзагообразные интенсификаторы с малым шагом;

- плоские и сужающиеся щелевые тракты со сложным оребрением;

– модели входных кромок лопаток с циклонной камерой, «вихревой матрицей», пористой структурой.

Исследование теплообмена в рассмотренных выше деталях турбины проводилось методом калориметрирования в жидкометаллическом термостате, который допускает различную форму представления экспериментальных данных. Основными параметрами первичной оценки эффективности охлаждения разработанной конструкции являются поля распределения тепловых потоков  $q$ , коэффициенты теплопередачи  $k_g$  или теплоотдачи  $\alpha_g$  на поверхности детали со стороны охлаждающего воздуха [12].

Более удобны для сравнения деталей, имеющих существенные отличия в конструкции тракта охлаждения, обобщенные характеристики вида  $Nu = f(Re, Pr)$ , где  $Nu$ ,  $Re$ ,  $Pr$  – критерии Нуссельта, Рейнольдса и Прандтля, соответственно [13]. Применение разработанных технологий тепловых испытаний и доводки в комплексе с теплогидравлическими характеристиками исследованных щелевых трактов охлаждения деталей турбины позволили расширить информационную базу для расчета и проектирования охлаждаемых конструкций, сократить сроки и производственные затраты на их создание.

### **Библиографический список**

1. Попов В.Г., Викулин А.В., Ярославцев Н.Л., Сундуков А.А., Чеснова В.А., Побежимовский Е.В. Калориметрический метод теплового контроля теплонапряженных деталей ГТД и ГТУ // Научные труды (Вестник МАТИ). 2011. № 18 (90). С. 50-53.

2. Колесник С.А., Формалев В.Ф., Селин И.А. Математическая модель и программный комплекс сопряженного теплообмена между вязкими газодинамическими течениями и охлаждаемыми лопатками газовых турбин // Труды МАИ, 2015, № 80: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=56941>

3. Магеррамова Л.А., Васильев Б.Е. Влияние ориентации монокристалла на напряженно-деформированное состояние и прочность лопаток газовых турбин // Вестник Московского авиационного института. 2012. Т. 19. № 5. С. 89-97.

4. Викулин А.В., Попов В.Г., Ярославцев Н.Л., Чеснова В.А. Методика определения теплофизических параметров, влияющих на относительную глубину охлаждения лопаток газовых турбин // Авиационная промышленность. 2012. № 3. С. 20-24.

5. Горелов Ю.Г., Строкач Е.А. Анализ закономерностей расчета коэффициента теплоотдачи от газа на входных кромках сопловых лопаток турбин высокого давления // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 1. С. 80-85.

6. Попов В.Г., Викулин А.В., Чеснова В.А., Маркелов М.С. Влияние геометрических характеристик каналов сложной конфигурации на многопараметрические функции теплообмена // Авиационная промышленность. 2013. № 1. С. 17-20.

7. Попов В.Г., Викулин А.В., Ярославцев Н.Л., Сундуков А.А., Борматов С.С., Семенов В.Н., Чеснова В.А., Побежимовский Е.В. Разработка комбинированной системы охлаждения сопловой лопатки турбины высокого давления // Авиационная промышленность. 2010. № 4. С. 18-22.

8. Чеснова В.А., Попов В.Г., Викулин А.В. Совершенствование конструкции охлаждаемых лопаток высокотемпературных газовых турбин с целью повышения надежности и ресурса работы современных авиационных ГТД и энергетических ГТУ // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. 2012. № 2 (23). С. 7-11.

9. Чеснова В.А. Разработка перспективной технологии создания и теплового проектирования теплонапряженных деталей турбин авиационных газотурбинных двигателей и газотурбинных установок // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т. 21. № 4. С. 93-108.

10. Попов В.Г., Викулин А.В., Чеснова В.А. Исследование гидравлического сопротивления щелевого канала с прерывистыми перемычками в системах охлаждения лопаток высокотемпературных газовых турбин // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15. №4. С. 819-824.

11. Завалишин И.В., Финогеев А.Г. Особенности технологической подготовки производства деталей турбины газотурбинного двигателя // Труды МАИ, 2012, № 56: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=30157>

12. Щербаков М.А., Воробьев Д.А., Маслаков С.А., Равикович Ю.А. Определение коэффициента теплоотдачи на пере лопатки турбины на нерасчётных режимах работы // Вестник Московского авиационного института. 2013. Т. 20. № 3. С. 95-103.

13. Силуянова М.В., Попова Т.В. Разработка методики проектирования и расчета теплообменного аппарата для газотурбинных двигателей сложного цикла // Труды МАИ, 2016, №85: <http://www.mai.ru/science/trudy/published.php?ID=66210>