

## Особенности технологии изготовления турбинных лопаток с пористым охлаждением\*

© А.Ф. Третьяков

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, 105005, Россия

*Система проникающего охлаждения передней кромки турбинной лопатки обеспечивает выход охлаждающего газа на поверхность и способствует повышенной теплозащиты. Для реализации способа охлаждения турбинных лопаток необходимо разработать такие технологические процессы, как изготовление листового пористого материала с требуемыми свойствами, листовая штамповка и консолидация оболочки с корпусом лопатки. Представлены результаты инженерно-технических разработок и экспериментальных исследований возможности применения пористого сетчатого материала в системе охлаждения турбинных лопаток высокотемпературных парогазовых установок перегретым водяным паром. Разработаны технологические процессы изготовления горячей прокаткой в вакууме листового пористого сетчатого материала из стали 12X18H10T с переменной проницаемостью, процессы гибки при формообразовании оболочки по профилю передней кромки турбинной лопатки и высокотемпературной пайки оболочки с корпусом лопатки. Полученные результаты механических и тепловых испытаний показали, что предложенные технологии изготовления турбинных лопаток с пористым охлаждением обеспечивают их работоспособность и исключают возможность проникновения горячего газа через пористую оболочку во внутреннюю полость лопатки.*

**Ключевые слова:** парогазовая турбина, лопатка, пористое охлаждение, пар, пористый сетчатый материал, прокатка, гибка, пайка.

**Введение.** Перспективы развития электроэнергетики вызывают интерес к схемам парогазовых установок (ПГУ) с впрыском пара в камеру сгорания газовой турбины. Часть пара, генерируемого в котле-утилизаторе для подачи в камеру сгорания, может быть использована для более эффективного охлаждения турбинных лопаток (ТЛ), что позволит существенно повысить температуру рабочего тела на входе в турбину.

Необходимость поиска новых эффективных способов охлаждения лопаток газовых турбин возникла при создании нового поколения ПГУ с впрыском пара и температурой в камере сгорания ~1600 °С. Перегрев передней кромки лопатки, которая в процессе эксплуатации воспринимает максимальные температурные нагрузки, может привести к ее разрушению и остановке турбины.

---

\* В работе принимали участие В.К. Стратьев, А.Ф. Поляков, В.Н. Семенов

Для предотвращения перегрева передней кромки ТЛ применяют непроникающее (конвективное) и проникающее охлаждение.

Непроникающее охлаждение заключается в том, что струю охлаждающей среды подают под давлением через полость корпуса лопатки на внутреннюю поверхность передней кромки. Однако такая схема не обеспечивает надежного охлаждения ТЛ при использовании в качестве рабочей среды высокотемпературных и высокоскоростных газовых потоков.

Система проникающего охлаждения передней кромки лопаток обеспечивает выход охлаждающего газа на их поверхность, что способствует повышению эффективности теплозащиты. Известны две схемы проникающего охлаждения: конвективно-заградительное и пористое.

При конвективно-заградительной схеме охлаждения выход охлаждающей среды достигается за счет перфорации на передней кромке лопатки. Однако наличие струй, выходящих из отверстий, вызывает газодинамическое нарушение, а при большой разности температур между охлаждающей средой и корпусом лопатки приводит к возникновению в ней термических напряжений и возможному разрушению передней кромки.

Перспективным методом тепловой защиты лопаток высокотемпературных ПГУ является проникающее пористое охлаждение. Двойной механизм этого метода охлаждения, который состоит из поглощения тепловой энергии, поступающей от рабочего тела (газа), при проникновении охладителя через пористую оболочку и оттеснения высокотемпературного потока от поверхности ТЛ охладителя, обеспечивает высокую эффективность тепловой защиты ТЛ.

**Анализ систем охлаждения турбинных лопаток.** Наиболее эффективные системы охлаждения имеют лопатки современных авиационных турбин, газом-охладителем в которых является сжатый компрессором воздух. В стационарных газотурбинных установках можно использовать и другие охладители, например перегретый водяной пар. При заданных температурах газа  $T_{\Gamma}$ , обтекающего лопатки турбины, и охладителя  $T_{\text{охл}}$  интенсивность теплообмена в ТЛ может характеризоваться относительной величиной охлаждения (безразмерной относительной температурой)

$$\theta = (T_{\Gamma} - T_{\text{л}}) / (T_{\Gamma} - T_{\text{охл}}),$$

где  $T_{\text{л}}$  — температура лопатки.

Чем интенсивнее процесс теплоотдачи, тем при меньшем относительном расходе газа-охладителя  $\bar{G}$  достигается надежное охлаждение.

Относительный расход газа-охладителя определяли по формуле

$$\bar{G} = G_{\text{охл}} / G_{\text{г}},$$

где  $G_{\text{охл}}$  — расход газа, используемого для охлаждения лопатки;  $G_{\text{г}}$  — полный расход газа.

Оценка интенсивности теплообмена безразмерной величиной  $\theta$  удобна при сравнении различных схем теплозащиты ТЛ. Относительная величина охлаждения позволяет определять температуру рассматриваемого участка лопатки для заданного режима работы турбины. Чем выше значение  $\theta$ , тем меньше температура ТЛ отличается от температуры охладителя, следовательно, тем лучше теплозащита.

Сравнение эффективности конвективной, конвективно-заградительной и пористой схем охлаждения ТЛ, выполненное в ОИВТ РАН [1], показало, что наибольшее значение коэффициента  $\theta$  при заданном относительном расходе охладителя достигается для пористых поверхностей, охлаждаемых перегретым водяным паром ( $T \sim 350$  °С). Одним из препятствий использования пористого охлаждения является необходимость предохранения пор от засорения частицами, содержащимися в продуктах сгорания, и от уменьшения их размеров в результате окисления при высоких температурах. Однако в ПГУ, где в качестве охладителя применен перегретый водяной пар, а пористая оболочка изготовлена из жаростойкой стали или нихрома с размером пор около 100 мкм, в значительной степени устраняется опасность резкого снижения проницаемости и перегрева пористой оболочки.

Анализ известных конструкций лопаток с пористым охлаждением позволил установить, что наиболее технологичной является ТЛ, состоящая из оребренного многоканального корпуса (стержня), который воспринимает динамические нагрузки и обеспечивает подвод охлаждающего газа к поверхности. При этом пористая оболочка может быть закреплена по всей поверхности или в наиболее теплонагруженном участке на передней кромке лопатки.

**Технологические процессы изготовления проницаемых элементов турбинных лопаток.** Технологический процесс изготовления ТЛ с пористым охлаждением включает следующие этапы: создание листового пористого материала с заданным комплексом свойств, гибка оболочки по профилю ТЛ и соединение (сваркой или пайкой) оболочки с корпусом из сплава на никелевой основе, изготовленным литьем по выплавляемым моделям.

В современном машиностроении нашли применение металлические пористые материалы, которые отличаются значительным разнообразием типов структурообразующих элементов и технологических процессов их изготовления. Основные виды пористых материалов и способы их изготовления приведены в таблице.

**Виды металлических пористых материалов и процессы их получения**

Вид пористого материала	Структурообразующий элемент	Способ получения
Порошковый	Порошок с размерами частиц 0,0001...1,0 мм	Прессование, прокатка, сварка прокаткой
Волоконный	Волокно диаметром 0,01...0,8 мм	Прессование, прокатка
Металлорезина	Спираль диаметром 0,2...0,3 мм	Прессование в пресс-формах без спекания
Сетка	Тканая фильтровая сетка с диаметром проволоки 0,03...1,2 мм	—
Комбинированный	Порошок + волокно; сетка + порошок; перфорированные листы + сетка	Совместная прокатка, сварка прокаткой, плазменное напыление порошка на сетку
Слоистый	Лист, фольга	Диффузионная и контактная сварка
Сетчатый	Навитая проволока диаметром 0,01...0,8 мм; тканые и вязаные сетки с диаметром проволоки 0,03...1,2 мм	Прессование, сварка прокаткой, диффузионная сварка, пайка

Для изготовления проницаемой оболочки ТЛ требуется пористый материал, обладающий следующим комплексом свойств [2]:

- равномерной или переменной проницаемостью по всей поверхности оболочки;
- высокой термостойкостью, поскольку многократные температурные перепады могут быть значительными;
- необходимой жаростойкостью;
- высокой механической прочностью;
- удовлетворительными технологическими свойствами (штампруемостью, свариваемостью и др.).

Требуемым комплексом свойств в наибольшей степени обладает пористый сетчатый материал (ПСМ) из стали 12Х18Н10Т. При одинаковых значениях гидравлического сопротивления ПСМ по своим механическим и технологическим свойствам превосходит порошковые проницаемые материалы [3, 4].

Наиболее широкое применение получил технологический процесс изготовления листовых ПСМ горячей прокаткой в вакуумированных контейнерах (конвертах) тканых сеток из стали 12Х18Н10Т [4].

Исследования жаростойкости и механических свойств ПСМ показали, что при рабочих температурах менее 750 °С оптимальными свойствами для изготовления оболочек высокотемпературных ТЛ обладает материал на основе сеток с квадратными ячейками из стали 12Х18Н10Т [2].

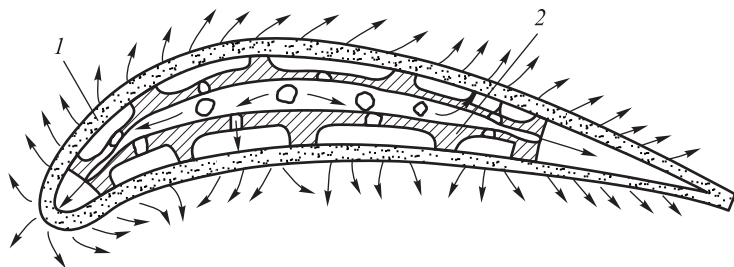
В целях разработки технологического процесса изготовления ТЛ с пористым охлаждением по всей поверхности лопатки в работах [2, 5]

проведен комплекс исследований, на основе которых получена ТЛ с оболочкой из ПСМ (рис. 1). При изготовлении пористых элементов для оболочек использованы тканые сетки с квадратными ячейками № 014 (ТУ 14-4-501-14) из стали 12Х18Н10Т, которые подвергали травлению в растворе из  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , KF. Затем сетки собирали в брикет под углом  $45^\circ$  одна относительно другой и помещали в стальные контейнеры (конверты), в которых создавался вакуум  $5 \cdot 10^{-1}$  мм рт. ст. Время нагрева контейнера при температуре  $1180 \dots 1200$  °С составляло  $7 \dots 10$  мин. Относительное обжатие брикета в процессе горячей прокатки должно обеспечивать образование сварных соединений проволок сеток и требуемые свойства ПСМ. После прокатки при комнатной температуре листовая заготовка извлекалась из контейнера.

Толщина изготовленного таким образом ПСМ составляла  $0,7$  мм, пористость  $\Pi = 0,43$ , размер пор  $100$  мкм, предел прочности  $\sigma_b = 105$  МПа, а относительное удлинение при разрыве  $\delta = 11$  %.

Технологический процесс гибки опытной партии оболочек ТЛ из ПСМ заключается в последовательном деформировании листовой заготовки в штампе с эластичной подушкой [5].

При листовой штамповке оболочек ТЛ изделия с радиусом гибки передней кромки оболочки, равным  $2$  мм, получены без трещин и расслоения ПСМ. Однако в результате пружинения заготовки не достигается полного прилегания оболочки к корпусу лопатки (см. рис. 1), что затрудняет процесс соединения ее с ребрами.



**Рис. 1.** Конструкция турбинной лопатки с пористым охлаждением:  
1 — пористая оболочка; 2 — корпус (силовой стержень) лопатки

Консолидацию оболочки с корпусом выполняли диффузионной сваркой на установке типа СДВУ в приспособлении, представляющем собой калибровочный штамп, в котором оболочка прижимается к ребрам по всему контуру ТЛ. Температура диффузионной сварки  $1200 \dots 1220$  °С, глубина вакуума  $1 \cdot 10^{-3}$  мм рт. ст., время сварки  $20$  мин. Сила, прикладываемая к свариваемым заготовкам в штампе, составляла  $20$  кН, нагрев осуществлялся индукционным устройством.

**Результаты испытаний.** Тепловые испытания показали, что изготовленные ТЛ обеспечили работу газотурбинной установки в горячем потоке при температуре 1000 °С в течение 4 ч без видимых дефектов. Однако лопатка с пористой оболочкой по всей поверхности корпуса имеет ряд недостатков, связанных с отработкой технологии соединения ее элементов. Так, наблюдается неравномерное обжатию оболочки по контуру, что приводит к ее изгибу и заполнению каналов корпуса ТЛ, а также к низкому качеству сварного соединения оболочки на выходной кромке лопатки.

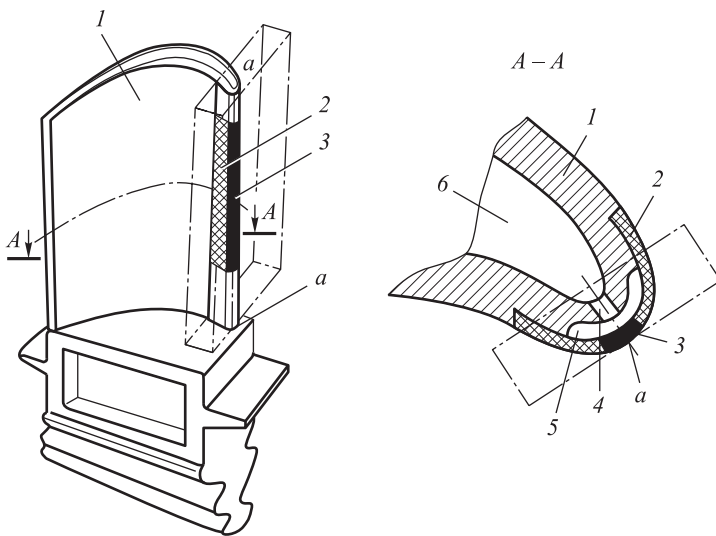
Экспериментальные исследования эффективности охлаждения изготовленных ТЛ, проведенные в лабораторных условиях, показали низкое значение коэффициента  $\theta$ . Это вызвано в первую очередь малым гидравлическим сопротивлением оболочки из ПСМ. Поэтому, как показано в работе [1], выдуваемый газ через проницаемую оболочку не может компенсировать напор основного потока горячего газа, он затекает во внутреннюю полость и повышает температуру в наиболее теплонагруженной части ТЛ — в передней кромке.

Повышение эффективности и надежности тепловой защиты передней кромки лопатки возможно в результате совершенствования конструкции ТЛ с пористым охлаждением, разработки технологии изготовления оболочки из ПСМ, выполненной по профилю передней кромки с заданным распределением проницаемости, и неразъемного ее соединения с корпусом, обеспечивающего высокий уровень прочности.

Для того чтобы устранить выявленные недостатки схемы пористого охлаждения всей поверхности ТЛ, в конструкцию лопатки были внесены изменения в соответствии с предложенным новым способом пористого охлаждения и устройством для его реализации, защищенными патентом [6]. Задача изобретения — создание такого способа тепловой защиты лопаток газовых турбин, который обеспечивает защиту от проникновения горячего газа через проницаемую оболочку на передней кромке ТЛ. Согласно изобретению, конструкция передней кромки изменена таким образом, что оболочка в зоне критической линии стала непроницаемой. Струи газа-охлаждителя, поступающие во внутреннюю полость лопатки, ударяются о непроницаемый участок оболочки и охлаждают его. Далее охладитель разворачивается и достигает проницаемой поверхности передней кромки, через поры которой выходит на внешнюю поверхность лопатки, омываемую высокотемпературным рабочим газом. При этом горячий газ оттесняется от поверхности, создавая надежную теплозащиту передней кромки. Кроме того, наличие непроницаемого участка в зоне критической линии обеспечивает его двойное охлаждение: сначала при подаче охладителя, а затем за счет теплопроводности по проволокам ПСМ.

Таким образом, предложенный способ теплозащиты объединяет конвективно-кондуктивное и проникающее (транспирационное) охлаждение лопаток высокотемпературных газовых турбин и является альтернативой используемому конвективно-заградительному (перфорационному) охлаждению, поскольку предусматривает снижение расхода газа-охладителя и увеличение ресурса работы ТЛ.

Устройство, реализующее предлагаемый способ охлаждения лопатки газовой турбины (рис. 2), представляет собой конструкцию оболочкового типа с комбинированным охлаждением, которое включает переднюю часть корпуса 1 с внутренней полостью 6 и полостью 5, прилегающей к зоне критической линии  $a - a$  передней кромки.



**Рис. 2.** Модель лопатки газовой турбины с передней кромкой из ПСМ:

1 — корпус лопатки; 2 — проницаемая оболочка; 3 — непроницаемая полоска; 4 — направляющие отверстия; 5, 6 — полости подвода охлаждающего газа

Полости 5 и 6 соединены между собой каналами (отверстиями) 4, оси которых проходят через критическую линию. Передняя кромка ТЛ выполнена в виде проницаемой оболочки 2. В зоне ее критической линии расположена непроницаемая полоска 3, напротив которой находятся выходные отверстия каналов 4. Проницаемая оболочка 2 с полоской 3 закреплены на корпусе 1. Ширина полоски 3 не должна превышать диаметра отверстий каналов 4.

Описанное устройство работает следующим образом. Газ-охладитель подают к передней кромке лопатки из внутренней полости 6 корпуса 1 лопатки через каналы 4 в виде струй. Струи направляются в полость 5, прилегающую к критической линии кромки, ударяются о

непроницаемую полосу 3 и растекаются вдоль проницаемой оболочки 2, выходят через ее поры на наружную поверхность ТЛ и оттесняют от поверхности высокотемпературный газ.

Для реализации предложенного способа охлаждения передней кромки ТЛ и устройства для его осуществления разработаны технологические процессы изготовления пористой сетчатой заготовки с размером пор  $\sim 100$  мкм из стали 12Х18Н10, листовой штамповки проницаемой оболочки с радиусом гибки 2 мм и консолидации ее с корпусом ТЛ. Указанные разработки являются новыми техническими решениями, на которые выданы патенты [7, 8].

Для изготовления проницаемой оболочки лопатки газовой турбины, содержащей непроницаемую полосу, в качестве исходных заготовок использована сетка с квадратными ячейками № 014 из стали 12Х18Н10Т. Из рулона вырезали заготовки вдоль проволок сеток и под углом  $45^\circ$ . Каждый слой сетки подвергали химической очистке в растворе  $\text{HNO}_3$ ,  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , KF, промывали водой, а после сушки электростатическим методом наносили на поверхность проволок слой меди толщиной 2...4 мкм, а затем — слой серебра той же толщины в качестве припоя. Далее каждый слой сетки подвергали холодной прокатке при относительном обжатии  $\varepsilon = 0,2$ . Предварительно были изготовлены полосы из фольги толщиной 0,1 мм из стали 12Х18Н10Т и шириной, равной радиусу кривизны передней кромки лопатки (2 мм). На одной из сеток закрепляли конденсаторной сваркой полоски, расстояние между которыми составляло 65 мм. Далее сетки в количестве 7 шт. собирали в брикет таким образом, чтобы проволоки каждого слоя сетки были расположены под углом  $45^\circ$  одна относительно другой, а сетку с полосками размещали в середине брикета.

Собранные сетки помещали в контейнер (конверт) и создавали в нем разрежение  $5 \cdot 10^{-1}$  мм рт. ст. Контейнер нагревали до температуры примерно  $1000^\circ\text{C}$  и выдерживали в течение 2...3 мин. За это время происходило расплавление припоя. Затем контейнер подвергали горячей прокатке с относительным обжатием брикета сеток  $\varepsilon = 0,2$ . После охлаждения из контейнера извлекали листовую заготовку толщиной 0,7 мм и с размером пор 100 мкм, размещали ее в штампе для листовой штамповки таким образом, чтобы непроницаемый участок проходил по линии гибки входной кромки оболочки лопатки. При изготовлении из полученного ПСМ оболочки ТЛ разрушения и расслоения заготовки не наблюдались.

В качестве заготовки для изготовления макета ТЛ с пористым охлаждением передней кромки использован каркас лопатки первой ступени авиационной газовой турбины Рыбинского авиационного КБ.

Крепление оболочки к каркасу ТЛ из сплава ЖС6У посредством сварки вызывает образование дефектов вследствие больших терми-



ческих напряжений в местах соединения. Поэтому при изготовлении опытных лопаток использована высокотемпературная пайка.

В соответствии с технологией, приведенной в патенте [8], предложенный способ пайки осуществляется следующим образом. На паяемую поверхность каркаса наносят гальваническим методом слой никелевого покрытия толщиной 1...2 мкм, затем слой меди толщиной 7...10 мкм. Указанные слои покрытий выполняют функцию припоя. Выбор толщины покрытий обусловлен необходимостью уменьшения слоя припоя между паяемыми поверхностями, чтобы избежать возможности заполнения ячеек сетки и вытекания расплава из зазора. Наличие подслоя никеля под медным покрытием способствует повышению вязкости припоя и его удержанию в зоне соединения.

Собранное изделие помещают в печь, создавая в ней вакуум  $1 \cdot 10^{-2}$  мм рт. ст., и проводят пайку при температуре 1020...1050 °С в течение 2...3 мин. В процессе пайки медь взаимодействует с никелем, образуя твердый раствор. В результате получается небольшое количество вязкого расплава, который при указанных режимах пайки не успевает вытечь из зазора. Проведенные металлографические исследования показали, что в паяном соединении отсутствуют дефекты.

Экспериментальные исследования эффективности тепловой защиты передней кромки ТЛ с пористым охлаждением выполняли на двух моделях, представляющих собой полуцилиндры с внутренним радиусом 4 мм из ПСМ с пористостью  $\Pi = 0,46$ , одна из них с равномерной проницаемостью по всей поверхности, а вторая — с непроницаемой полоской в зоне критической линии. Модель с непроницаемой полоской соответствует схеме охлаждения лопатки, приведенной на рис. 2. В качестве газа, набегающего на пористую оболочку, и газа-охладителя использовали воздух. При этом для упрощения эксперимента в лабораторных исследованиях применен метод «обращенной задачи» [1], т. е. температура набегающего потока воздуха равна 15 °С, а температура вдуваемого охладителя, поступающего в подводящую камеру, — 80 °С. Температура оболочек в зоне критической линии измерялась термомпарами в трех точках.

Результаты эксперимента показали, что температура оболочки с равномерной проницаемостью по всей поверхности существенно ниже температуры вдуваемого подогретого воздуха и, следовательно, значения  $\theta$  малы. Это связано с низким гидравлическим сопротивлением ПСМ, в результате чего набегающий поток газа частично затекает во внутреннюю полость и снижает температуру оболочки в первую очередь на критической линии.

Для пористой оболочки с непроницаемой вставкой относительная величина охлаждения существенно больше, чем при испытании пер-

вой модели ТЛ. При этом все термомпары показывают близкие значения. Такое выравнивание температуры является весьма важным положительным фактором, отражающим приближение защищаемой поверхности к изотермическим условиям. Кроме того, сопоставление двух исследуемых вариантов пористого охлаждения оболочки ТЛ показало, что предложенная в патенте [7] схема теплозащиты передней кромки при равных значениях  $\theta$  обеспечивает снижение расхода газа-охлаждителя в 2,5 раза.

**Выводы.** 1. На основании аналитических и экспериментальных исследований установлено, что для тепловой защиты лопаток парогазовой турбины, обтекаемых высокотемпературными газовыми потоками, эффективным является способ, при котором оболочка передней кромки изготовлена из ПСМ с непроницаемым в зоне критической линии участком, обдуваемым охладителем. Проницаемая часть передней кромки охлаждается транспирационно и посредством конвективно-кондуктивного теплоотвода. Такое техническое решение позволяет, с одной стороны, добиться высокой эффективности теплозащиты передней части ТЛ, а с другой — понизить требования к интенсивности конвективного охлаждения по внутренней полости лопатки за счет образования на непроницаемой ее поверхности теплозащитного слоя.

2. Для реализации запатентованного способа охлаждения передней кромки ТЛ предложены новые технические решения, которые позволили разработать технологические процессы изготовления опытного образца лопатки, включающие создание ПСМ из стали 12Х18Н10Т с переменной проницаемостью, размером пор, равным 100 мкм, и пределом прочности  $\sigma_b = 105$  МПа, гибку оболочки по профилю передней кромки радиусом 2 мм и высокотемпературную пайку оболочки с корпусом в вакуумной печи при температуре 1020...1050 °С электролитическим нанесением припоя на соединяемые поверхности.

3. Результаты тепловых испытаний изготовленных моделей ТЛ показали, что предложенный способ теплозащиты более эффективен, чем ранее разработанная схема транспирационного пористого охлаждения по всей поверхности лопатки. Так, при одинаковых значениях  $\theta$  расход охлаждающего газа уменьшается в 2,5 раза. Кроме того, установлено, что ТЛ обладает недостаточно высоким значением относительной величины охлаждения ( $\theta = 0,4$  при относительном расходе пара  $\bar{G} = 2$  %), поскольку для изготовления лопатки использован корпус авиационной ТЛ с конвекционной схемой охлаждения. Дальнейшее совершенствование тепловой защиты лопаток ПГУ с пористым охлаждением передней кромки должно быть направлено на доработку конструкции корпуса с учетом условий работы ТЛ и технологии ее изготовления.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Зейгарник Ю.А., Поляков А.Ф., Стратьев В.К., Третьяков А.Ф., Шехтер Ю.Л. *Испытания пористого сетчатого материала в качестве обложки лопаток высокотемпературных газовых турбин*. Москва, ОИВТ РАН. Препринт. 2010, № 2–502, 64 с.
- [2] Третьяков А.Ф. Модернизация системы охлаждения турбинных лопаток энергетических установок. Часть 1. Исследование механических, гидравлических и технологических свойств пористых сетчатых материалов. *Ремонт, восстановление, модернизация*, 2015, № 1, с. 22–26.
- [3] Зейгарник Ю.А., Поляков А.Ф., Сухорученко С.Ю., Шехтер Ю.Л. Гидравлические характеристики обложки из пористых материалов. *Теплофизика высоких температур*, 1996, т. 34, № 6, с. 924–928.
- [4] Белов С.В., ред. *Пористые проницаемые материалы: справочное издание*. Москва, Металлургия, 1987, 335 с.
- [5] Третьяков А.Ф. Модернизация системы охлаждения турбинных лопаток энергетических установок. Часть 2. Технология изготовления турбинной лопатки с обложкой из пористого сетчатого материала. *Ремонт, восстановление, модернизация*, 2015, № 2, с. 14–18.
- [6] Поляков А.Ф., Ревизников Д.Л., Семенов В.Н., Стратьев В.К., Третьяков А.Ф. *Способ охлаждения передней кромки обтекаемого тела и устройство для его осуществления*. Пат. № 2186223 Российская Федерация, 2002, бюл. № 21, 6 с.
- [7] Третьяков А.Ф., Кременский И.Г., Поляков А.Ф., Ревизников Д.Л., Семенов В.Н., Стратьев В.К. *Способ изготовления пористого листового материала из металлических сеток*. Пат. № 2187392 Российская Федерация, 2002, бюл. № 23, 3 с.
- [8] Семенов В.Н., Зейгарник Ю.А., Полежаев Ю.В., Поляков А.Ф., Стратьев В.К., Третьяков А.Ф. *Способ изготовления изделий сложного профиля с сетчатой обложкой*. Пат. № 2179096 Российская Федерация, 2002, бюл. № 21, 3 с.

Статья поступила в редакцию 26.10.2015

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Третьяков А.Ф. Особенности технологии изготовления турбинных лопаток с пористым охлаждением. *Инженерный журнал: наука и инновации*, 2015, вып. 6. URL: <http://engjournal.ru/catalog/pmce/tctp/1427.html>

**Третьяков Анатолий Федорович** родился в 1945 г., окончил МВТУ им. Н.Э. Баумана в 1969 г. Д-р техн. наук, профессор кафедры «Технологии обработки материалов» МГТУ им. Н.Э. Баумана. Автор более 150 публикаций. Область научных интересов: создание изделий на основе проектируемых материалов с заданным комплексом свойств. e-mail: [tretyakov@bmstu.ru](mailto:tretyakov@bmstu.ru)

## Features of manufacturing technology for turbine blades with effusion cooling

© A.F. Tretyakov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, 105005, Russia

*The article describes a turbine blade front edge sweat cooling system. The system provides cooling gas output onto the surface and enhances thermal protection. To implement the method of turbine blade cooling it is necessary to develop processes of manufacturing the porous material sheets with the desired properties, stamping and consolidating the membrane with turbine blade housing. The article presents the results of engineering developments and experimental research of the possibility of using the porous meshed material for the turbine blade cooling system in high temperature combined-cycle plants with superheated steam. Technological processes of manufacturing porous meshed material sheets by vacuum hot-rolling the steel 12X18H10T with variable permeability, bending when membrane shaping on the profile of the turbine blade leading edge, and brazing the membrane to the blade body are developed. The results of mechanical and thermal tests have shown that the developed technology of manufacturing turbine blades with effusion cooling ensures cooling method efficiency and eliminate the possibility of penetrating hot gas through the porous membrane into the inner cavity of the blade.*

**Keywords:** steam and gas turbine, blade, effusion cooling, steam, porous meshed material, rolling, bending, brazing.

### REFERENCES

- [1] Zeygarnik Yu.A., Polyakov A.F., Stratyev V.K., Tretyakov A.F., Shekhter Yu.L. *Ispytaniya poristogo setchatogo materiala v kachestve obolochki lopatok vysokotemperaturnykh gasovykh turbin* [Testing Porous Meshed Material as the Shell of High-Temperature Gas Turbine Blades]. Moscow, Preprint, Joint Institute for High Temperatures of the RAS Publ., 2010, no. 2–502, 64 p.
- [2] Tretyakov A.F. *Remont, vosstanovlenie, modernizatsiya — Repair, restoration, modernization*, 2015, no. 1, pp. 22–26.
- [3] Zeygarnik Yu.A., Polyakov A.F., Sukhoruchenko S.Yu., Shekhter Yu.L. *Teplofizika vysokikh temperatur — High Temperature*, 1996, vol. 34, no. 6, pp. 924–928.
- [4] Belov S.V., ed. *Poristye pronitsaemye materialy: spravochnoe izdanie* [Porous Permeable Materials: Reference book]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1987, 335 p.
- [5] Tretyakov A.F. *Remont, vosstanovlenie, modernizatsiya – Repair, restoration, modernization*, 2015, no. 2, pp. 14–18.
- [6] Polyakov A.F., Reviznikov D.L., Semenov V.N., Stratyev V.K., Tretyakov A.F. *Sposob okhlazhdeniya peredney kromki obtekaemogo tela i ustroystva dlya ego osushchestvleniya* [A Method of Cooling the Streamlined Body Front Edge and a Device for Its Implementation]. RF Patent no. 2186223, 2002, bulletin no. 21, 6 p.
- [7] Tretyakov A.F., Kremenskiy I.G., Polyakov A.F., Reviznikov D.L., Semenov V.N., Stratyev V.K. *Sposob izgotovleniya poristogo listovogo materiala iz metallicheskiikh setok* [A Method of Manufacturing Porous Sheet Material from Metal Mesh]. RF Patent no. 2187392, 2002, bulletin no. 23, 3 p.
- [8] Semenov V.N., Zeygarnik Yu.A., Polezhaev Yu.V., Polyakov A.F., Stratyev V.K., Tretyakov A.F. *Sposob izgotovleniya izdeliy slozhnogo profilya s setchatoy obolochkoy* [A Method of Manufacturing Products of Complex Profile with a Meshed Shell]. RF Patent no. 2179096, 2002, bulletin no. 21, 3 p.

**Tretyakov A.F.** (b.1945) graduated from Bauman Moscow Higher Technical School in 1969. Dr. Sci. (Eng.), Professor of the Materials Processing Technologies Department at Bauman Moscow State Technical University. Author of over 150 publications. Research interests: creating products based on the designed materials with given set of properties. e-mail: tretyakov@bmstu.ru