

УДК 629.7.036:539.4

Канд. техн. наук Р. П. Придорожный¹, канд. техн. наук А. В. Шереметьев¹,
д-р техн. наук А. П. Зиньковский²

¹ГП «Ивченко-Прогресс», г. Запорожье

²Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, г. Киев

РАСЧЕТНАЯ ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ТЕПЛОЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ОХЛАЖДАЕМЫХ РАБОЧИХ ЛОПАТКАХ ТУРБИН ВЫСОКОГО ДАВЛЕНИЯ АВИАЦИОННЫХ ГАЗОТУРБИННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Теплозащитные покрытия широко применяются для уменьшения действующих рабочих температур на поверхности охлаждаемых рабочих лопаток турбин и, следовательно, позволяют двигателю работать при более высоких, более эффективных температурах. В статье представлены результаты расчетных исследований эффективности применения теплозащитных покрытий на охлаждаемых рабочих лопатках турбины высокого давления. Установлено, что эффективность применения теплозащитных покрытий существенно зависит от конструкции лопатки, особенностей ее системы охлаждения, толщины покрытия, действующих рабочих температур и нагрузок.

Ключевые слова: охлаждаемая рабочая лопатка турбины, теплозащитное покрытие, система охлаждения, расчетная модель, тепловое состояние, напряженное состояние, ресурс.

Введение и постановка задачи

Стремление к достижению более высокой температуры газа перед турбинами авиационных газотурбинных двигателей (АГТД) в сочетании с требованием увеличения ресурса и повышения надежности охлаждаемых лопаток турбин высокого давления (ТВД) обуславливает необходимость совершенствования их систем охлаждения, применения новых материалов, защиты от воздействия повышенных температур, коррозии, окисления и ухудшения механических свойств материала.

Вследствие использования при создании рассматриваемых лопаток современных жаропрочных никелевых сплавов, сложно одновременно получить как необходимый уровень их прочности, так и удовлетворительный уровень коррозионной стойкости. Поэтому, в последние годы, работоспособность охлаждаемых рабочих лопаток ТВД обеспечивается внедрением теплозащитных покрытий (ТЗП) [1]. При повышении температуры газа перед турбиной их применение позволяет существенно снизить температуру основного материала лопатки и следовательно уменьшить термические напряжения, а также защитить перо от окисления и коррозии.

В настоящее время широко внедряются трехслойные керамические ТЗП, состоящие из термобарьерного внешнего слоя, создаваемого из окислов $ZrO_2-Y_2O_3$, второго промежуточного и

третьего (подложки) слоев, полученные электронно-лучевой технологией.

Как показывает опыт проектирования и эксплуатации охлаждаемых лопаток турбин с конвективно-пленочной системой охлаждения (КПСО), в частности разработки ГП «Ивченко-Прогресс», эффективность применения ТЗП с точки зрения ресурса рассматриваемых лопаток зависит от их конструктивных особенностей и системы охлаждения. Об этом свидетельствуют данные изменения ресурса охлаждаемых лопаток ТВД различных АГТД за счет применения ТЗП, полученные на основе результатов расчетов напряженно-деформированного состояния наиболее термонапряженного среднего сечения, которые приведены в табл. 1. Видно, что при нанесении покрытия одной и той же толщины всегда имеет место увеличение ресурса рассматриваемых лопаток. При этом его возрастание тем выше, чем более развита и совершенна система охлаждения лопатки. Однако, в связи с активизацией работ по внедрению керамических ТЗП в турбинах АГТД, возникает необходимость оценки влияния их толщины на тепловое и напряженное состояния, а также ресурс охлаждаемых рабочих лопаток ТВД, что и является целью данной работы.

Объект исследования и его расчетная модель

Учитывая приведенные в табл. 1 данные, в качестве объекта исследования была выбрана наи-

более перспективная современная многоканальная охлаждаемая рабочая лопатка ТВД АГТД с конвективно-пленочной системой охлаждения с рядами перфорационных и щелевых отверстий, наиболее термонапряженное среднее сечение которой показано на рис. 1.

Для расчетного установления закономерностей теплового и напряженного состояний исследуемых лопаток с покрытием использовался метод конечных элементов и программный комплекс ANSYS. Однако, при решении этой задачи возникают определенные трудности, которые обуславливаются такими причинами. Во-первых, толщина теплозащитного покрытия на порядок меньше толщины стенки пера охлаждаемой лопатки [2]. Во-вторых, структурные особенности и многослойность покрытия усложняют выявление влияния внешних температур и нагрузок на отдельные его составляющие [3]. Эти обстоятельства затрудняют конечноэлементное моделирование исследуемого объекта и расчетное определение закономерностей его как температурного, так и напряженного состояний. В работе, охлаждаемая лопатка с выбранным покрытием представляется однородной средой. Основанием такого допущения служит опыт проектирования, доводки и эксплуатации рассматриваемых лопаток. В этом случае предполагается совместность перемещений на границе основного материала

лопатки и покрытия при одновременном пренебрежении его жесткостью по сравнению с пером. Влияние ТЗП определяется граничными условиями и механической нагрузкой.

Анализ результатов расчетов

В соответствии с постановкой задачи, был проведен комплекс расчетных исследований по определению влияния толщины теплозащитного покрытия на характеристики теплового и напряженного состояний выбранной охлаждаемой рабочей лопатки ТВД, а также ее ресурс. Толщина покрытия h варьировалась до 0,5 мм. Для сравнения указанные характеристики были определены для лопатки без покрытия ($h = 0$).

Расчет напряженного состояния лопатки проводился в упругопластической постановке при действии газодинамических, центробежных и возникающих вследствие неравномерного ее нагрева температурных нагрузок. Кроме того, при высоких температурах учитывалась ползучесть материала лопатки. Распределения температур и напряжений определялись в расчетном сечении охлаждаемой лопатки при заданных условиях нагружения и температурного воздействия на максимальном взлетном режиме работы двигателя.

Рассмотрим результаты исследований по определению влияния толщины покрытия на тепловое состояние исследуемой лопатки. В каче-

Таблица 1 – Расчетные данные определения относительного увеличения ресурса охлаждаемых рабочих лопаток ТВД с теплозащитным покрытием

Марка двигателя	Вид КПСО	Уровень увеличения ресурса лопатки
Д-436-148	с 3 рядами перфорационных отверстий	1,3
Д-18Т	с 4 рядами перфорационных отверстий	1,5
АИ-222-25	с 3 рядами перфорационных отверстий и 1 рядом щелевых отверстий	2,3
Д-27	с 5 рядами перфорационных отверстий и 1 рядом щелевых отверстий	2,6

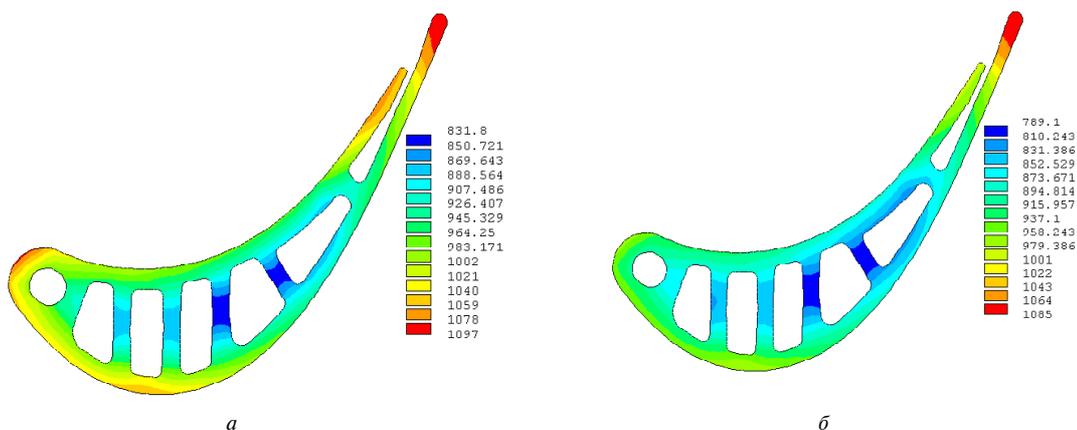


Рис. 1. Распределение температур в среднем сечении охлаждаемой рабочей лопатки ТВД без ТЗП (а) и его толщине $h=0,5$ мм (б)

стве примера на рис. 1 представлено распределение температур в расчетном среднем сечении лопатки без покрытия (а) и при его толщине h , равной 0,5 мм (б). Как видно, покрытие не оказывает существенного влияния на распределение температуры по сечению, вызывая ее снижение ΔT . На рис. 2 приведены зависимости изменения максимальной ΔT_{max} , минимальной ΔT_{min} и средней ΔT_{mid} температур по сечению, а также температуры в его точке с минимальным запасом прочности ΔT_{pnt} определяющей ресурс рассматриваемой лопатки, от толщины покрытия. Как и следовало ожидать, наиболее чувствительной к увеличению его толщины является средняя температура по сечению охлаждаемой лопатки, снижение которой демонстрирует эффективность применения ТЗП в рассматриваемой лопатке. Наиболее низкое влияние толщины покрытия оказывает на максимальную температуру лопатки, которая имеет место на выходной ее кромке (см. рис. 1), охлаждение которой затруднительно и требует значительного количества воздуха. В то же время низкая теплопроводность ТЗП позволяет существенно понизить минимальную температуру лопатки во внутреннем контуре лопатки, где и располагается наиболее опасная с точки зрения прочности зона лопатки с минимальным запасом прочности. Поэтому закономерность изменения температуры от толщины ТЗП в этой зоне практически совпадает с таковой для минимальной температуры в лопатке.

Исходя из полученных результатов влияния толщины покрытия на тепловое состояние лопатки, были проведены вычислительные эксперименты по определению ее влияния на напряженное состояние в точке среднего сечения лопатки с минимальным запасом прочности. На рис. 3

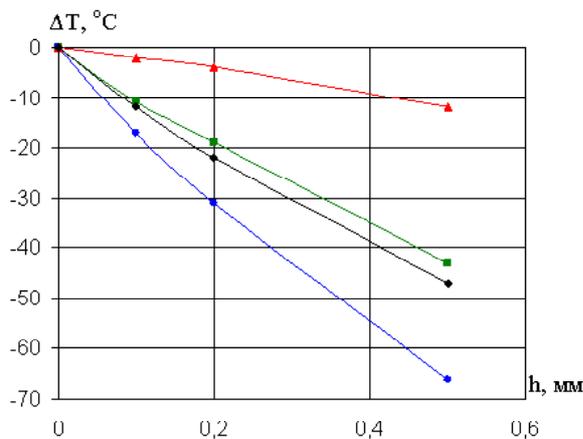


Рис. 2. Зависимости уменьшения максимальной ΔT_{max} (▲), минимальной ΔT_{min} (■) и средней ΔT_{mid} (●) температуры, а также температуры в точке с минимальным запасом прочности ΔT_{pnt} (◆) от толщины ТЗП в среднем сечении охлаждаемой лопатки

представлены зависимости относительных напряжений $\bar{\sigma}^{h \neq 0} = \sigma^{h \neq 0} / \sigma^{h=0}$ от толщины покрытия.

Из приведенных данных следует, что увеличение толщины ТЗП позволяет существенным образом уменьшить уровень термических напряжений σ_T . При этом увеличение толщины ТЗП, как следствие, приводит к увеличению уровня напряжений растяжения σ_R , возникающих от действия центробежных нагрузок в расчетном сечении рассматриваемой охлаждаемой лопатки. Однако возрастание указанных напряжений практически в два раза меньше, чем уменьшение уровня термических напряжений при той же толщине покрытия. Таким образом, при увеличении толщины ТЗП уровень суммарных напряжений s_{Σ} , действующих в рассматриваемой точке среднего сечения лопатки, снижается, но менее существенно по сравнению с уровнем термических напряжений.

Как уже отмечалось, при воздействии высоких температур необходимо при анализе напряженного состояния лопатки учитывать ползучесть материала, поскольку с течением времени она приводит к значительному перераспределению напряжений как от внешних, так и от термических нагрузок. Так, температурные напряжения, как внутренне уравновешенные, уменьшаются, стремясь к полному исчезновению. При этом напряжения от внешних нагрузок уменьшаются в наиболее нагретых и возрастают в менее нагретых зонах лопатки. Результатом такого перераспределения напряжений исследуемой лопатки является изменение характера зависимости относительного изменения уровня суммарных напряжений $\sigma_{\Sigma c}$, рассчитанных с учетом деформаций ползу-

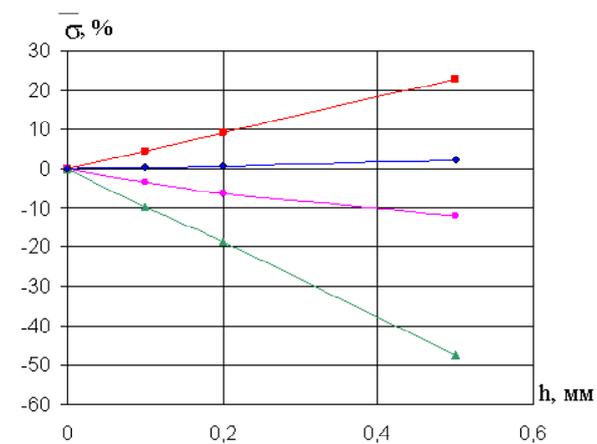


Рис. 3. Зависимости относительного уровня термических напряжений σ_T (▲), напряжений от центробежных нагрузок σ_R (■), суммарных напряжений без учета σ_{Σ} (●) и с учетом $\sigma_{\Sigma c}$ (◆) ползучести материала лопатки от толщины ТЗП в точке среднего сечения лопатки с минимальным запасом прочности

части, от толщины ТЗП (см. рис. 3). Если без учета ползучести материала уровень суммарных напряжений уменьшается с увеличением толщины ТЗП, то при ее учете наблюдается их возрастание. Однако, даже при толщине ТЗП, равной 0,5 мм, такое возрастание суммарных напряжений составляет не более 2,3 %.

Установленные закономерности влияния толщины покрытия на изменение характеристик напряженного состояния лопатки объясняются такими факторами. С одной стороны, с увеличением толщины покрытия снижается уровень температур и термических напряжений, а с другой — увеличивается уровень напряжений от центробежных нагрузок и замедляются процессы ползучести материала.

В табл. 2 приведены результаты расчетов характеристик температурного и напряженного состояний, а также ресурса рассматриваемой охлаждаемой рабочей лопатки ТВД для выбранных значений толщины покрытия. Их анализ показывает, что с возрастанием толщины покрытия имеет место существенное увеличение ресурса лопатки. Это объясняется тем, что основной вклад в этот процесс вносит эффект уменьшения уровня температур T_{pnt} в опасной точке наиболее напряженного сечения лопатки, хотя уровень суммарных напряжений $\sigma_{\Sigma c}$, рассчитанных с учетом деформаций ползучести и возрастает с увеличением толщины покрытия.

Следует отметить, что существует оптимальная величина толщины покрытия, обеспечивающая его максимальную эффективность. Дальнейшее ее увеличение нецелесообразно, поскольку при этом будут резко возрастать центробежные нагрузки в корневом сечении лопатки, и применение ТЗП будет малоэффективно. Кроме того, чрезмерное наращивание толщины покрытия приводит к его выкрашиванию от действия центробежных и термических сил, а также сил трения газового потока [4].

Таблица 2 — Результаты расчета характеристик температурного и напряженного состояний, а также ресурса охлаждаемой рабочей лопатки ТВД при варьировании толщины теплозащитного покрытия

h , мм	T_{pnt} , °С	$\sigma_{\Sigma c}$, МПа	Ресурс, ч
0	874	307	6000
0,1	862	308	10000
0,2	852	309	16000
0,5	825	314	45000

Как уже отмечалось, применение теплозащитных покрытий обуславливается тенденцией современного авиационного двигателестроения к повышению температуры газа перед турбиной. Поэтому были проведены расчеты по определению влияния указанной температуры на ресурс K рассматриваемой охлаждаемой лопатки ТВД с нанесенным теплозащитным покрытием. Как пример, на рис. 4 приведены зависимости относительного увеличения ресурса $\bar{K}^{h \neq 0} = K^{h \neq 0} / K^{h=0}$ от температуры газа перед турбиной T_g по результатам анализа теплового и напряженного состояний лопатки в наиболее нагруженном среднем, а также корневом сечениях в случае покрытия толщиной $h = 0,2$ мм. Из представленных данных следует, что для данной лопатки максимальная эффективность применения ТЗП наблюдается при температуре газа перед турбиной $T_g = 1800$ К. При более низкой температуре газа перед турбиной в корневом сечении пера лопатки она значительно ниже, чем в более термонапряженном среднем сечении. Однако, уже начиная с $T_g = 1750$ К, эффективность применения покрытия в корневом сечении становится выше, чем в среднем. Таким образом, полученные результаты расчетов свидетельствуют, что для конкретной лопатки с теплозащитным покрытием существует определенная температура газа перед турбиной, при которой его применение наиболее эффективно.

Выводы

1. Эффективность применения теплозащитных покрытий существенно зависит от конструкции охлаждаемой рабочей лопатки ТВД и особенностей ее системы охлаждения. Чем более развита и совершенна ее система охлаждения, тем выше эффективность покрытия.

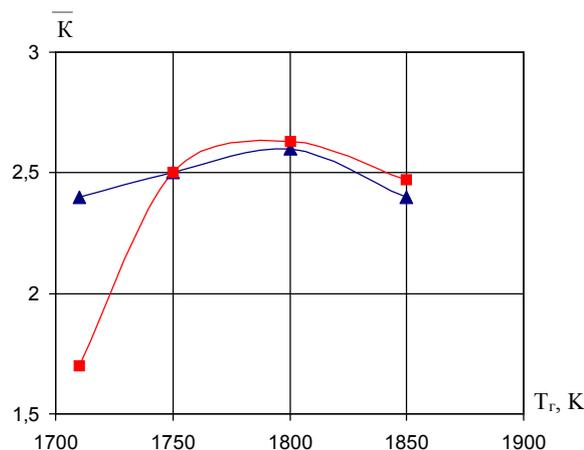


Рис. 4. Зависимость относительного увеличения ресурса в наиболее нагруженном среднем (▲) и корневом (■) сечениях охлаждаемой лопатки ТВД с ТЗП от температуры газа перед турбиной T_g

2. Основной вклад в увеличение ресурса охлаждаемой рабочей лопатки ТВД с теплозащитным покрытием вносит эффект уменьшения уровня температур в опасной зоне лопатки.

3. Для конкретной лопатки с ТЗП существует определенная температура газа перед турбиной, при которой применение теплозащитного покрытия наиболее эффективно.

Список литературы

1. Коломышев П. Т. Высокотемпературные защитные покрытия для никелевых сплавов / П. Т. Коломышев. – М. : Металлургия, 1991. – 240 с.
2. Тамарин Ю. А. Свойства ТЗП, наносимых электронно-лучевой технологией / Ю. А. Тамарин, Е. Б. Качанов // Новые технологические процессы и надежность. – М. : ЦИАМ, 2008. – № 7. – С. 125–143.
3. Срабатываемые, износостойкие и теплозащитные покрытия для деталей газового тракта турбины, компрессора и камеры сгорания ГТД / [В. А. Барвинок, И. Л. Шитарев, В. И. Богданович и др.] // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С. П. Королева. – 2009. – № 3(19) Часть 1. – С. 11–28.
4. Современные методы обеспечения прочностной надежности деталей авиационных двигателей / Под ред. Ю. А. Ножницкого, Б. Ф. Шорра, И. Н. Долгополова. – М. : ТОРУС ПРЕСС, 2010. – 456 с.

Поступила в редакцию 10.06.2013

Придорожний Р.П., Шеремет’єв О.В., Зінковський А.П. Розрахункова оцінка ефективності застосування теплозахисних покриттів на охолоджуваних робочих лопатках турбін високого тиску авіаційних газотурбінних двигунів

Теплозахисні покриття широко застосовуються для зменшення діючих робочих температур на поверхні охолоджуваних робочих лопаток турбін і, отже, дозволяють двигуну працювати при більш високих, більш ефективних температурах. У статті представлені результати розрахункових досліджень ефективності застосування теплозахисних покриттів на охолоджуваних робочих лопатках турбін високого тиску. Установлено, що ефективність застосування теплозахисних покриттів суттєво залежить від конструкції лопатки, особливостей її системи охолодження, товщини покриття, діючих робочих температур і навантаження.

Ключові слова: охолоджувана робоча лопатка турбіни, теплозахисне покриття, система охолодження, розрахункова модель, тепловий стан, напружений стан, ресурс.

Pridorozhny R., Sheremetyev A., Zinkovskii A. Computational estimation of efficiency of application of thermal barrier coatings on high-pressure turbine cooled blades of aero gas turbine engines

Thermal barrier coatings are commonly used to reduce the actual working temperature of the high pressure turbine blades surface and hence permit the engine to operate at higher more efficient temperatures. This paper presents the results of calculation investigations of service efficiency of thermal barrier coatings on high pressure turbine blades. Efficiency of application thermal barrier coatings essentially depends on the design of the blade, features of its cooling system, thickness of the coating, actual working temperatures and loadings, is established.

Key words: cooled turbine blade, thermal barrier coating, cooling system, azimuthal, computational model, thermal state, stress state, service life.