

УДК 669.018.44

Е.А. Тихомирова¹, С.А. Будиновский², А.А. Живушкин¹, Е.Ф. Сидохин³**ОСОБЕННОСТИ РАЗВИТИЯ ТЕРМИЧЕСКОЙ УСТАЛОСТИ
В ДЕТАЛЯХ ИЗ ЖАРОПРОЧНЫХ СПЛАВОВ С ПОКРЫТИЕМ**

DOI: 10.18577/2071-9140-2017-0-3-20-25

В современных авиационных двигателях детали горячего тракта турбины работают в условиях высоких температур, агрессивных сред и многократных теплосмен. Для защиты поверхности лопаток турбин используют многослойные теплозащитные покрытия (ТЗП). В данной работе анализируются результаты лабораторных термоциклических испытаний и металлографических исследований образцов-имитаторов сопловых турбинных лопаток, выполненных из интерметаллидных жаропрочных никелевых сплавов с ТЗП, полученными с использованием ионно-плазменной и магнетронных технологий. Проведен анализ особенностей развития пластической и упругой деформации в поверхности образцов при циклическом «нагреве-охлаждении» и предложен новый подход для оценки результатов с помощью графической карты термоциклических испытаний.

Ключевые слова: термическая усталость, теплозащитные покрытия, термоциклические испытания, трещины термической усталости.

The details of turbine hot section work under conditions of high temperatures, aggressive environments and multiple thermal changes in modern aviation engines. Multilayer heat-resistant coatings are applied to protect turbine blades surface. The work analyses the results of laboratory thermal cycle tests and metallographic studies of imitation samples of nozzle turbine blades from intermetallic heat-resistant nickel alloys with thermal-protective coatings, produced with the use of ion-plasma and magnetron technologies. The analysis of the features of development of plastic and elastic deformation in the surface of samples under cyclic "heating-cooling" is carried out and a new approach is proposed to estimate results using a graphic card of thermal-cycle tests.

Keywords: thermal fatigue, , heat-resistant coatings, thermal-cycle tests, thermal fatigue crack.

¹Акционерное общество «Климов» [Join Stock Company «Klimov»]; e-mail: klimov@klimov.ru

²Федеральное 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

³Общество с ограниченной ответственностью «КБ Рентгеновские приборы» [Limited Liability Company «CB Rentgen devices»]; e-mail: esidohin@yandex.ru

Введение

Изделия авиационного двигателестроения работают в условиях экстремальных температур и нагрузок, уровень которых становится все выше. В качестве одного из путей повышения их ресурса рассматривается использование теплозащитных покрытий (ТЗП) на поверхности пера лопаток турбин. В настоящее время активно разрабатываются многослойные покрытия, представляющие собой комбинацию из внешнего керамического слоя и двух внутренних металлических слоев [1, 2]. Керамический слой за счет низкой теплопроводности обеспечивает снижение температуры поверхности лопатки турбины на 50–100°C и более. Внутренние металлические слои предохраняют поверхность пера лопаток от окисления и обеспечивают удовлетворительное сцепление керамического слоя с подложкой.

Циклический нагрев лопаток является важным фактором их разрушения. Вследствие возникаю-

щей деформации в процессе быстрого циклического нагрева и последующего охлаждения происходят необратимые изменения структуры и свойств материала, которые благоприятствуют зарождению и развитию трещин усталостной природы и в результате – преждевременному разрушению лопатки турбины [3, 4]. Несомненный интерес представляет анализ процессов развития термоусталостного разрушения лопаток с ТЗП для установления закономерностей возникновения очагов разрушения и развития трещин при циклических нагревах таких конструкций.

В связи с этим проведены лабораторные термоциклические испытания полых образцов – имитаторов пера охлаждаемой лопатки турбины, в условиях, воспроизводящих условия эксплуатации сопловых лопаток турбин авиационного двигателя, а также металлографические исследования зарождения очагов разрушения и развития трещин термической усталости.

Исследованные материалы и методика испытаний

Объектом исследования служили монокристаллические образцы с кристаллографической ориентацией [111] из жаропрочных интерметаллидных никелевых сплавов ВКНА-1В и ВКНА-25. Многослойное теплозащитное покрытие системы NiCrAlHf+AlNiHf+ZrYGdO, состоящее из двух металлических и керамического слоев, получено ионно-плазменным способом с использованием вакуумного дугового и магнетронного среднечастотного распыления металлических мишеней.

Термоциклические испытания включали многократный (до 10^3 циклов) нагрев в электропечи на воздухе до максимальной температуры 950 или 1050°C и последующее охлаждение на воздухе до 400°C или в воде – с 950 до 200°C. Продолжительность нагрева – соответственно 270 и 300 с, а охлаждения: 90 с. При испытаниях вход во внутреннюю полость образцов заполняли теплоизолирующим материалом (асбестом), чтобы исключить их конвекционный нагрев и охлаждение со стороны внутренней поверхности.

После заданного числа термических циклов «нагрев–охлаждение» проводили визуальный осмотр образцов с помощью микроскопа для оценки состояния покрытия, а также их деформации. Длину, количество и плотность трещин, характер их образования и роста, а также местоположение определяли на шлифах поперечного и продольного сечения лопатки. Поперечное сечение выполняли на расстоянии 5 мм от края лопатки-имитатора, а продольное – на расстоянии 6 мм от края выходной кромки. Схема разрезки образца приведена на рис. 1. На рис. 2 показаны геометрические размеры и соотношение размеров в поперечном сечении образца.

Для сравнения поведения образцов с ТЗП и без него проведены термоциклические испытания образцов из сплава ВКНА-1В. Испытания включали

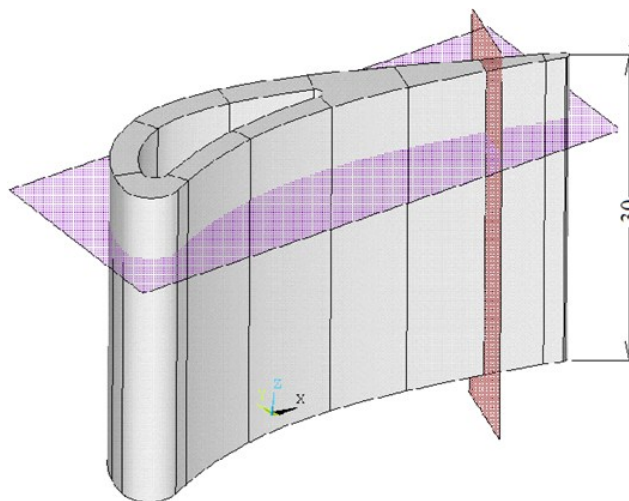


Рис. 1. Общий вид монокристаллической лопатки-имитатора и схема изготовления поперечного и продольного сечений

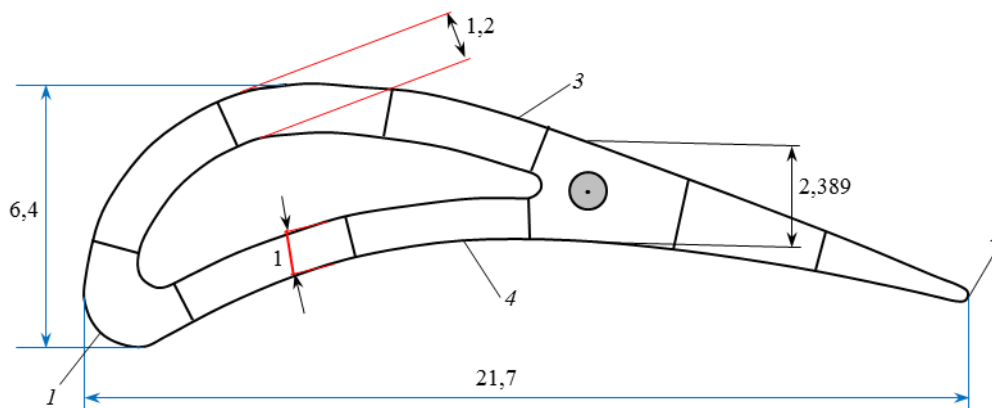


Рис. 2. Поперечное сечение лопатки-имитатора:
1 – входная кромка; 2 – выходная кромка; 3 – спинка; 4 – корыто

500 термических циклов по режиму $400 \pm 950^\circ\text{C}$ с охлаждением на воздухе или 50 циклов по режиму $200 \pm 950^\circ\text{C}$ с охлаждением в воде.

Результаты термоциклических испытаний

Металлографические исследования образцов без ТЗП показали, что после 500 циклов испытаний с охлаждением на воздухе образуется небольшое количество узких трещин (3–4 шт.) максимальной длины 0,092 мм на выходной кромке, несколько трещин длиной $\sim 0,042$ мм на спинке и просматривается небольшой прогиб образцов ($\sim 0,04$ мм). В образцах с ТЗП после 500 циклов испытаний в тех же условиях обнаружено несколько трещин с максимальной длиной 0,162 мм на выходной кромке и множество широких трещин с максимальной длиной 0,107 мм в покрытии на спинке.

При испытаниях по режиму $200 \pm 950^\circ\text{C}$ с охлаждением в воде на выходной кромке уже после 50 циклов отмечено такое же количество трещин, как и при охлаждении на воздухе после 500 циклов. При этом на спинке образцов с ТЗП наблюдали гораздо большее количество (до 10) трещин с максимальной длиной 0,06 мм, а у образцов без ТЗП отмечено увеличение прогиба до 0,1 мм.

Исследованиями установлено, что на входной кромке образцов из сплава ВКНА-1В с ТЗП и без него при обоих режимах термоциклирования трещины не наблюдаются.

Различия в поведении сплавов ВКНА-1В и ВКНА-25 изучали на образцах с ТЗП. Образцы испытывали по режимам $400 \pm 950^\circ\text{C}$ и $400 \pm 1050^\circ\text{C}$ с охлаждением на воздухе на протяжении 1000 циклов и по режиму $200 \pm 950^\circ\text{C}$ с охлаждением в воде: 300 циклов.

При испытаниях с охлаждением на воздухе картина в обоих сплавах схожая: образуются множественные трещины в покрытии и только единичные трещины проникают внутрь металла на глубину 0,03–0,05 мм.

При испытаниях с охлаждением в воде уже после 15 циклов на выходной кромке, на спинке и корыте образуется множество трещин, длина которых больше толщины покрытия. По мере увеличения числа циклов до 300, в образцах из обоих сплавов происходит интенсивный рост трещин внутрь материала лопатки-имитатора при незначительном изменении их количества.

Особенности развития деформации

в образцах-имитаторах сопловых лопаток

Результаты испытаний свидетельствуют о том, что в тонкостенном образце, каковым является имитатор лопатки, под воздействием процессов, происходящих при циклических нагревах, развивается термическая усталость. Термическая усталость включает постепенное формирование в материале состояния, благоприятного для зарождения трещин, и их последующий рост, приводящий

в конечном итоге к разрушению детали. Происходит это из-за необратимых изменений структуры материала, инициируемых пластической деформацией $\varepsilon_{пл}$, которая является одним из способов компенсации естественного удлинения образца ($\varepsilon_0 = \alpha \cdot \Delta T$) в случае стесненной свободной термической деформации при нагреве. При этом деформация развивается по мере изменения температуры и при релаксации возникающих напряжений.

В обычных термоциклических испытаниях с использованием образцов из жаропрочных сплавов стеснение ε_0 создают специально – путем жесткого фиксирования головок образца в захватах при абсолютно жестком стеснении либо, варьируя жесткость стеснения, посредством упругого элемента в цепи нагружения образца, благодаря чему обеспечивается его частичное свободное удлинение. Изменение суммарной упругопластической деформации образца ($\Delta\varepsilon = \varepsilon_{упр} + \varepsilon_{пл}$) по мере изменения температуры при этих испытаниях может быть представлено с помощью карт термоциклических испытаний (ТЦ-карты) [5]. ТЦ-карты позволяют выявить величины пластической $\varepsilon_{пл}$ и упругой $\varepsilon_{упр}$ деформации в полуциклах нагрева и охлаждения, температуру начала пластической деформации $T_{н.пл}$, а также закономерности изменения соотношения $\varepsilon_{пл}$ и $\varepsilon_{упр}$ в процессе испытаний.

ТЦ-карта – это диаграмма, на которой совмещены графические зависимости от температуры суммарной упругопластической деформации $\Delta\varepsilon$ и упругой деформации $\varepsilon_{упр}$, которая определяется расчетным путем по значениям пределов текучести материала σ_T и величине модулей упругости E при сжатии (нагрев) и растяжении (охлаждение) для каждого значения температуры. На рис. 3 показаны ТЦ-карты для монокристаллов из сплавов ВКНА-1В и ВКНА-25.

Линии a и b представляют зависимость $\varepsilon_{упр}$ в областях нагрева и охлаждения соответственно. Их вид определяется свойствами сплавов, т. е. $\sigma_T \approx f(T)$ и $E \approx f(T)$. Линия c показывает, как изменяется в эксперименте $\Delta\varepsilon$ в ходе нагрева, следующего после полуцикла охлаждения, который представлен линиями d (для T_{max} : 850, 1050 и 1100 $^\circ\text{C}$). Поля диаграммы между осью T и линиями a и b – области упругой деформации сжатия (ниже оси T) и области растяжения (выше нее). Поля выше и ниже кривых a и b – это области пластической деформации.

Очень показательным примером полезности ТЦ-карт является сравнение развития деформации у монокристаллов сплава ВКНА-1В ориентировки [001] и [111]. Оно показывает, что у образцов ориентировки [111] пластическая деформация при нагреве начинается с $\sim 350^\circ\text{C}$ (рис. 3, a), а у ориентировки [001] – с $\sim 970^\circ\text{C}$ [5]. Не принимать это во внимание при обсуждении проблемы термической усталости ошибочно. Однако эта особенность монокристаллов сплава ВКНА-1В в научнотехнической литературе ранее не обсуждалась.

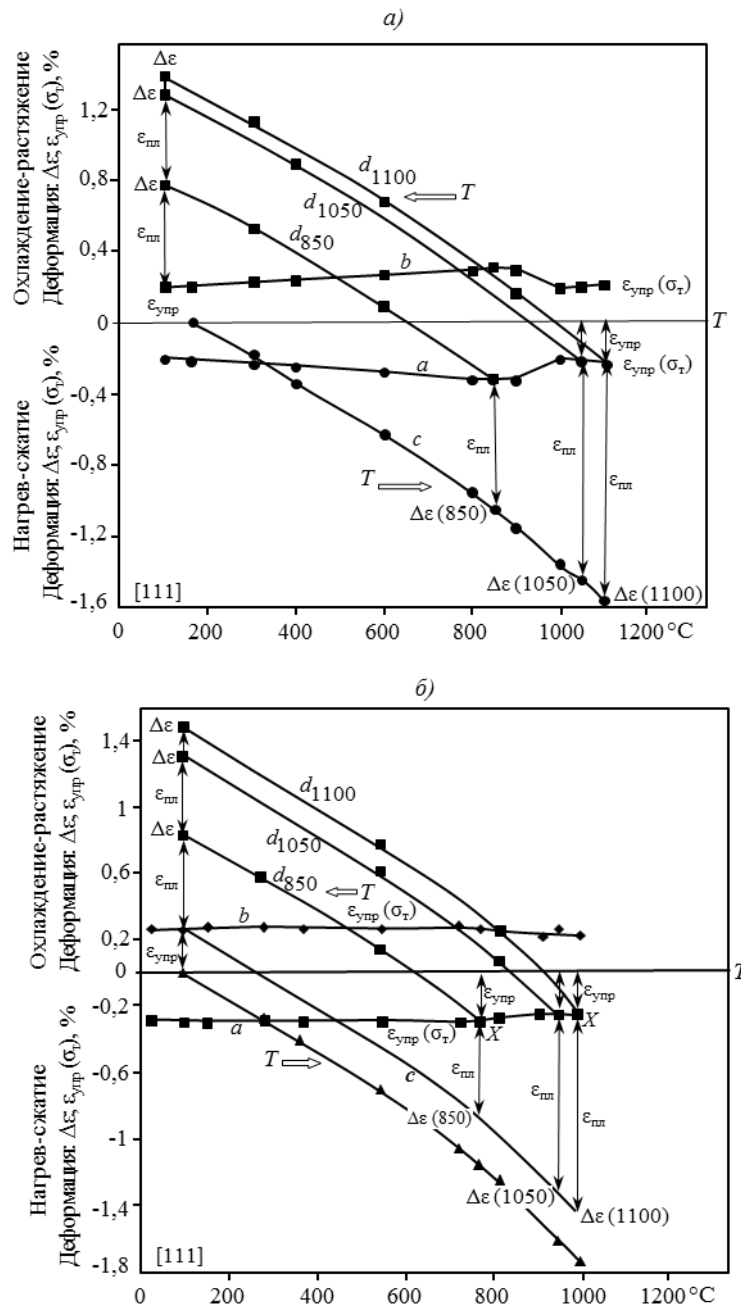


Рис. 3. Карты термоциклических испытаний монокристаллов ориентировки оси [111] сплавов ВКНА-1В (а) и ВКНА-25 (б)

В случае испытаний с неполным стеснением ($\Delta\epsilon < \epsilon_0$), на ТЦ-картах угол наклона кривых $\Delta\epsilon=f(T)$ к оси T уменьшается на участке упругой деформации (между линиями a и b). Следует отметить, что варьирование жесткости нагружения отражается на ходе кривой $\Delta\epsilon=f(T)$ только на участках упругой деформации $\epsilon_{упр}$ и проявляется в уменьшении наклона кривой на этом участке. Не считая нулевого, каждый полуцикл (например, нагрева) $T_{мин} \rightarrow T_{макс}$ включает участок, где уменьшается $\epsilon_{упр}$ растяжения по сравнению с предыдущим полуциклом охлаждения, затем уча-

сток роста $\epsilon_{упр}$ сжатия и участок, где происходит пластическая деформация $\epsilon_{пл}$, а $\epsilon_{упр}$ остается постоянной или изменяется, если предел текучести материала зависит от температуры [5].

ТЦ-карты позволяют установить температуру $T_{н.пл}$, при которой начинается пластическая деформация, и оценить протяженность данной области $\Delta T_{пл}$. В нулевом полуцикле из-за отсутствия первого участка величина $\epsilon_{пл}$ выше, чем в последующих полуциклах.

Главная особенность термоциклических испытаний образцов – это непрерывный рост пластической

деформации сжатия или растяжения после $T_{н.пл}$ вплоть до максимальной температуры T_{max} в полупериоде нагрева и до минимальной T_{min} в полупериоде охлаждения.

Иная картина развития пластической деформации имеет место при циклических нагревах реальных изделий. В них стеснение может возникать самопроизвольно из-за неравномерности температуры по объему тела или вследствие различий температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) сопряженных участков [6]. При этом, в отличие от лабораторных термоциклических испытаний образцов, температурный интервал, где протекает пластическая деформация, может быть произвольно расположен в пределах температурного диапазона циклического нагрева $T_{min} \rightleftharpoons T_{max}$. Это зависит от строения изделия и динамики изменения картины распределения температуры в нем, т. е. от различий температуры сопряженных участков.

Неоднозначной является и жесткость стеснения в каждой конкретной области. В наибольшей степени неравномерность распределения температуры имеет место на начальном этапе ее изменения, т. е. в начале нагрева и охлаждения. Здесь достигается наибольшее стеснение ϵ_0 и именно на этом этапе следует ожидать появления пластической деформации. Затем температура постепенно выравнивается, стеснение уменьшается и для его компенсации может быть вполне достаточно упругой деформации. Особенности процесса зависят от строения изделия, материала, из которого оно изготовлено, и особенностей изменения температуры в цикле. В имитаторах лопаток, которые использовали в работе, неравномерность распределения температуры возникает сразу же, как только начинается нагрев или охлаждение, что обусловлено локальной неоднородностью массы. При установке образца в печь тонкая выходная кромка (рис. 2) нагревается до T_{max} в течение нескольких секунд, а температура более массивной входной кромки меняется гораздо медленнее и отстает на сотни градусов, создавая тем самым стеснение ϵ_0 выходной кромки. Именно в этот период в выходной кромке реализуются все виды деформации, обеспечивающие компенсацию ϵ_0 . При этом упругая деформация $\epsilon_{упр}$ в материале соответствует достигнутому напряжению, равному пределу текучести сплава σ_T . По мере выравнивания температуры по поверхности образца $\epsilon_{упр}$ выходной кромки уменьшается. Поэтому последующее охлаждение с температуры T_{max} приводит почти сразу же к росту $\epsilon_{упр}$ растяжения, без снятия $\epsilon_{упр}$ сжатия от предшествующего нагрева, как это происходит при термоциклических испытаниях на образцах. Это очень важный момент и существенное отличие развития термической усталости в лопатках турбин, так как в каждом полупериоде нагрева или охлаждения лопатки деформация ее выходной кромки начинается сразу с роста $\epsilon_{упр}$,

т. е. как в нулевом полупериоде испытаний образцов. Вследствие этого достигаемая величина $\epsilon_{пл}$ в каждом полупериоде много больше, чем при термоциклировании стандартных образцов. Этот факт следует обязательно иметь в виду, имитируя в образцах процессы, идущие в реальных лопатках. Например, в работах [4, 7] показано, что релаксация напряжений во время выдержки при T_{max} увеличивает $\epsilon_{пл}$ в цикле и снижает долговечность. Полагают, что это происходит при стационарном режиме работы двигателя. Изложенное ранее показывает, что к долговечности реальных изделий это не должно иметь отношения, поскольку в них при T_{max} уже нет напряжений, которые достигались во время изменения температуры в полупериоде.

Результаты испытаний, проведенных на образцах-имитаторах, указывают на то, что в них имеет место подобное развитие событий и при охлаждении на воздухе, и в воде. Влияние охлаждающей среды (воздух, вода) при испытаниях проявилось в интенсивности образования трещин. Скорость отвода тепла и изменения температуры, конечно, влияли на скорость деформации при стеснении, но не могли вызвать принципиальные изменения динамики деформации. Дело, скорее всего, в том, что при более интенсивном охлаждении (в воде) возрастал градиент температур между выходной кромкой, имеющей наиболее тонкое сечение, и телом лопатки. Это увеличивало жесткость стеснения и, как следствие, величину пластической деформации в цикле. Ответ на этот вопрос могут дать испытания лопаток с теплозащитным покрытием, нанесенным не равномерно по всей поверхности пера, а избирательно (например, только в область выходной кромки), что позволит сделать распределение температуры более равномерным. В случае положительного результата этот прием может быть рекомендован для повышения долговечности реальных лопаток.

Отсутствие различий в результатах испытаний лопаток-имитаторов, выполненных из монокристаллов сплавов ВКНА-1В и ВКНА-25, показывает вид ТЦ-карт. Хорошо видно, что у обоих сплавов динамика развития деформации при циклических нагревах мало отличается, и поэтому не приходится ожидать у них каких-то значительных отличий в проявлении термической усталости.

Заключения

1. Проведенные термоциклические испытания образцов-имитаторов лопаток из сплавов ВКНА-1В и ВКНА-25 с теплозащитными покрытиями показали, что трещины термической усталости образуются преимущественно в покрытии на выходной кромке и на спинке пера. Это указывает на присутствие стеснения свободной термической деформации, которое развивается благодаря возникающим и изменяющимся в ходе термического цикла температурным градиентам между более тонкой выходной и входной кромкой пера лопатки.

2. Развитие разрушения при циклических нагревах реальных лопаток турбин имеет иную динамику – в отличие от термоциклических испытаний образцов. Деформация в каждом полцикле нагрева или охлаждения в лопатках начинается с роста упругой деформации сжатия или растяжения и по достижении величины предела упругости переходит в пластическую деформацию. Вследствие этого пластическая деформация в каждом полцикле такая же, как в нулевом полцикле термоциклических испытаний образцов.

3. С учетом способности ТЗП замедлять изменение температуры металла, находящегося под покрытием, при изменении температуры на внеш-

ней поверхности лопатки, возможно нанесение покрытия с заданным расчетным распределением по толщине на поверхности пера лопаток, что является одним из путей противодействия развитию термической усталости лопаток турбин и повышения их долговечности.

Благодарности

Авторы выражают признательность С.М. Балакину, чьи расчеты выявили своеобразие развития термической усталости в изделиях и позволили предложить один из путей возможного повышения их долговечности.

ЛИТЕРАТУРА

1. Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Гаямов А.М. Современное состояние и основные тенденции развития высокотемпературных теплозащитных покрытий для рабочих лопаток турбин авиационных ГТД // Авиационная промышленность. 2008. №4. С. 33–37.
2. Осокин В.А., Шпак П.А., Пилюк Е.Л. Перспективы совершенствования конструкций теплозащитных покрытий для лопаток газотурбинных установок // Перспективные материалы. 2008. №2. С. 19–27.
3. Баландин Ю.Ф. Термическая усталость металлов в судовом энергомашиностроении. СПб.: Судостроение, 1967. 272 с.
4. Дульнев Р.А., Котов П.И. Термическая усталость металлов. М.: Машиностроение, 1980. 200 с.
5. Тихомирова Е.А., Сидохин Е.Ф. ТЦ-карты – инструмент исследования термической усталости материалов в термоциклических испытаниях // Материаловедение. 2015. №8. С. 3–7.
6. Коффин Л.Ф. О термической усталости сталей // Жаропрочные сплавы при изменяющихся температурах и напряжениях. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1960. С. 188–258.
7. Тихомирова Е.А., Азизов Т.Н., Сидохин Е.Ф. Влияние высокотемпературной выдержки на термическую усталость жаропрочных сплавов // Технология металлов. 2013. №6. С. 34–37.