

## **Анализ влияния поврежденности материала на напряженно-деформированное состояние лопаток газотурбинных двигателей**

**Е. А. Задворный<sup>1</sup>, Л. В. Кравчук, К. П. Буйских, С. Г. Киселевская, Н. Н. Феофентов, А. Ю. Лебедин**

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

<sup>1</sup> yevgeniy@ukr.net

*Проанализировано тепловое и напряженно-деформированное состояние клиновидного образца, моделирующего состояние материала кромки лопатки газотурбинного двигателя, в процессе термоциклического нагружения в газовом потоке. Показано существенное влияние механизмов и кинетики деградации свойств материала поверхностных слоев на напряженное состояние различных зон клиновидного образца, характер зарождения и роста трещин термической усталости в зависимости от уровня повреждения. Представлены результаты исследования влияния размеров, локализации и кинетики роста трещин термической усталости на изменение напряженно-деформированного состояния конструкции (образца) в целом.*

**Ключевые слова:** жаропрочный сплав, деградированный поверхностный слой, термоусталостная трещина, термонапряженное состояние, газотурбинный двигатель.

Развитие методов учета кинетики поврежденности элементов конструкций в процессе эксплуатации с целью оценки их остаточного ресурса и живучести является одной из актуальных задач при решении вопросов обеспечения надежности современной техники, в частности газотурбинных двигателей (ГТД).

В литературных источниках широко освещены и обобщены результаты исследований по оценке влияния технологических, конструкционных и эксплуатационных факторов на работоспособность и исчерпание ресурса элементов ГТД, описаны методы контроля выявления повреждений [1–3], разработаны критерии и численные методы учета возникающих трещин, определения полей перемещений и напряжений в зоне вершины трещины [4, 5]. Исследовано влияние структурного состояния материала и поверхностного слоя, особенно его изменения (деградации), на повреждаемость элементов конструкций при термоциклическом нагружении [6, 7], влияние покрытий на напряженно-деформированное состояние (НДС) и долговечность элементов конструкций [8, 9], а также изучены процессы повреждаемости элементов ГТД [10–12]. Однако оценить влияние каждого из указанных факторов на процесс повреждаемости материала как в условиях эксплуатации, так и при термоусталостных испытаниях достаточно сложно.

Основной целью таких исследований является изучение НДС элементов конструкций, изготовленных их жаропрочных сплавов, в том числе с покрытиями, при термоциклическом нагружении с учетом закономерностей поврежденности материала, процессов зарождения и развития трещин.

В качестве исходных данных использовали результаты термоусталостных испытаний клиновидных образцов, моделирующих состояние материала кромки лопатки ГТД в реальных эксплуатационных условиях. Нагружение материала при аналогичных испытаниях, в отличие от других видов нагружения, характеризуется проявлением пространственно-временной неоднородности теплового и напряженно-деформированного состояния (ТНДС), а также целого ряда сопутствующих факторов, оказывающих влияние на повреждаемость материала в процессе эксплуатации. Экспериментальные исследования клиновидных образцов (рис. 1) проводили на газодина-

мических стендах Института проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины [13]. Использование этих образцов позволяет исследовать поведение материала в высокотемпературном скоростном потоке продуктов сгорания топлива переменной химической активности с возможностью приложения дополнительной механической нагрузки. При испытаниях исследовали процессы поврежденности материала и кинетику трещин термической усталости. В основу численного анализа теплового и НДС материала в цикле положены результаты термометрирования объектов исследования при стендовых испытаниях по фиксированным режимам термоциклирования. Один из характерных режимов термоциклического нагружения образцов показан на рис. 2. При исследованиях необходимые значения температуры и НДС материала кромки образца достигались путем выбора его геометрических параметров: угла раствора  $\varphi$ ; радиуса скругления кромки  $r$ ; длины  $L$  и высоты  $H$  хорды.

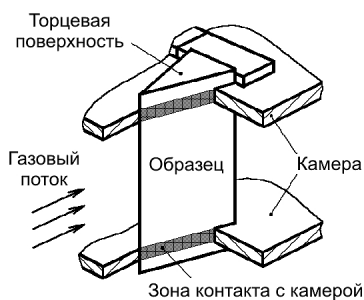


Рис. 1

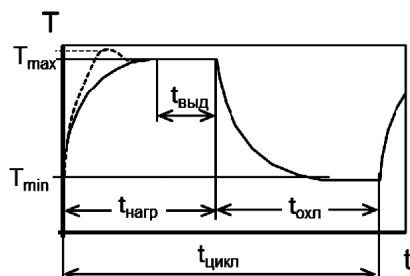


Рис. 2

Рис. 1. Расположение испытуемого образца в камере.

Рис. 2. Характерный режим изменения температуры газового потока в процессе испытаний.

С помощью пакета прикладных программ SPACE в пространственной постановке проводилось решение задачи определения теплового и НДС исследуемых образцов, моделировалось влияние поврежденности материала на НДС образцов, изучались вопросы, связанные с зарождением и развитием термоусталостных трещин, а также влиянием покрытий на поврежденность основного материала и долговечность элементов конструкций [14]. Учитывая пространственную и временную неоднородность тепловых процессов и процессов повреждаемости материала, что характерно для лопаток ГТД, тепловое состояние материала клиновидного образца определялось при решении нелинейной пространственной задачи нестационарной теплопроводности при смешанных граничных условиях теплообмена – граничных условиях первого и третьего рода.

Применение граничных условий третьего рода обусловлено спецификой рассматриваемой задачи. При достаточно близком расположении реперных точек и больших интенсивностях измеряемых тепловых процессов термодатчики могут исказить распределение температуры. С другой стороны, при численном решении задачи нестационарной теплопроводности с помощью метода конечных элементов (МКЭ) и описании распределения температуры по поверхности образца во времени отклонение температуры на несколько градусов может привести к значительному локальному возмущению поля напряжений. Кроме того, применение граничных условий третьего рода обусловлено необходимостью оценки влияния жаростойких покрытий на НДС и поврежденность материала, поскольку они позволяют наиболее корректно описать состояние композиции металл–покрытие. Граничные условия третьего рода определялись как результат решения обратной задачи теплопроводности при наличии данных о граничных условиях первого рода. При этом принципиальным было кор-

ректное задание начальных условий, так как решаемой задаче термоциклического нагружения характерна высокая степень неоднородности температурных полей и скорости стабилизации цикла.

Применение трехмерного моделирования является необходимым условием получения корректных данных в случае анализа НДС материала по высоте кромки образца. Только в пространственной постановке могут быть проведены исследования по оценке влияния концентраторов напряжений на НДС, в частности трещин термической усталости, зарождение и развитие которых происходит по всей высоте кромки образца в плоскостях, параллельных  $xu$  (рис. 3), и приводит к перераспределению напряжений.

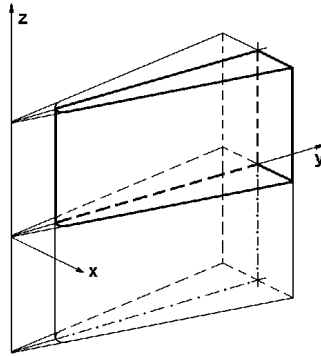


Рис. 3. Расположение расчетной модели относительно системы координат.

Напряженно-деформированное состояние образцов определяли в два этапа. На первом этапе решали задачу определения теплового состояния образца, на втором – несвязанную задачу термоупругости по определению НДС образца (рис. 4). При этом использовали образец с геометрическими размерами:  $\varphi = 15^\circ$ ;  $r = 0,7$  мм;  $L = 35$  мм;  $H = 80$  мм, изготовленный из сплава ЖС6У, при цикле нагружения  $T_{\min} = 350^\circ\text{C}$ ,  $T_{\max} = 1100^\circ\text{C}$  длительностью  $\tau = 120$  с с полуциклами нагрева и охлаждения в течение 60 с. Неоднородность НДС материала по высоте кромки клина, а также необходимость учета контакта образца с испытательной камерой иллюстрирует рис. 5.

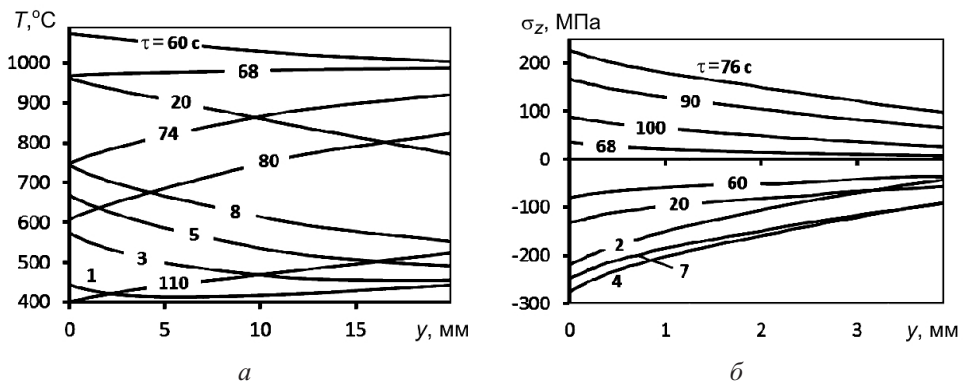


Рис. 4. Изменение температуры (а) и напряжений (б) вдоль хорды образца.

Результаты расчетов по определению влияния теплозащитных покрытий на НДС материала образцов показывают, что свойства покрытий, их толщина и конфигурация, а также технология нанесения существенно влияют на уровень напряжений в

материале основы и покрытия, а следовательно, и на степень поврежденности материала элементов конструкций. Так, анализ данных, полученных для различных типоразмеров образцов, покрытий и циклов нагружения, свидетельствует о том, что нанесение покрытий, как правило, приводит к снижению уровня напряжений в основном материале. Изменение напряжений в материале основы образца с длиной хорды  $L = 43$  мм без покрытия и с покрытием Ni–Co–Cr–Al–Y без учета и с учетом остаточных напряжений в предположении, что исходное состояние композиции основа–покрытие равномерно нагретого образца соответствует температуре  $800^\circ\text{C}$ , показано на рис. 6.

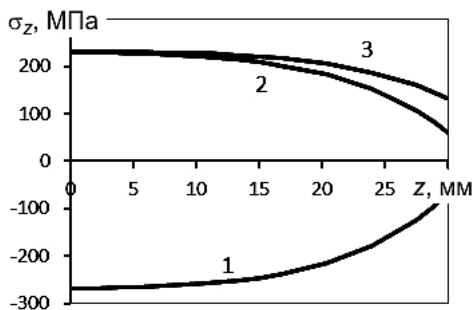


Рис. 5

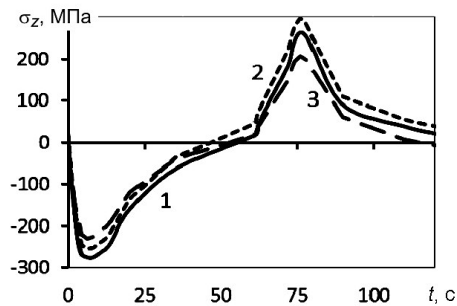


Рис. 6

Рис. 5. Распределение максимальных сжимающих (1) и растягивающих (2, 3) напряжений по высоте кромки клина (2, 3 – с учетом контакта образца с испытательной камерой и без учета соответственно).

Рис. 6. Изменение напряжений в цикле нагружения в материале основы образца без покрытия (1), с покрытием Ni–Co–Cr–Al–Y без учета (2) и с учетом (3) остаточных напряжений.

Учитывая, что влиянию температурно-силовых и коррозионно-эрозионных факторов подвержены поверхностные слои материала, важным и актуальным является поиск количественных связей между степенью деградации структуры и изменением его свойств в зонах действия максимальных термических напряжений с НДС элемента конструкции. Измерения глубины деградированного слоя ряда образцов [7] показывают, что после 2300 цикл нагружения при размахе напряжений  $2\sigma_a = 680$  МПа его средняя глубина составляет 40...45 мкм. В некоторых случаях глубина слоя достигает 100 мкм. Поскольку физико-механические характеристики окисных слоев неизвестны, для расчетной оценки НДС клиновидного образца с деградированным поверхностным слоем использовали усредненные характеристики однородного окисла Ni, а для слоя, обедненного  $\gamma'$ -фазой, был подобран аналоговый сплав со структурой без этой  $\gamma'$ -фазы.

Рассматриваемая задача решалась для равномерно нагретого образца при температуре  $100...1100^\circ\text{C}$ . Деградированный слой на поверхности элементов конструкции образуется в процессе наработки при различных режимах стационарного и нестационарного температурного воздействия, и расчет должен носить вероятностный характер. Учитывая необходимость оценки максимально возможных уровней напряжений, вызванных образованием деградированного слоя, расчет проводился для двух вариантов композиции основа–деградированный слой с нулевым полем остаточных напряжений при температуре 20 и  $1100^\circ\text{C}$ .

Результаты проведенных расчетов показывают, что в случае исходного состояния материала, определенного нулевым полем остаточных напряжений при  $20^\circ\text{C}$ , с повышением температуры увеличивается уровень напряжений в основном материале под деградированным слоем, достигая максимума при  $T \sim 700^\circ\text{C}$  (рис. 7). Дальнейшее

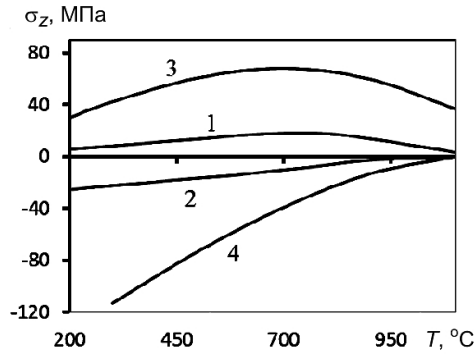


Рис. 7. Изменение напряженного состояния матрицы при толщине деградированного слоя 50 (1, 2) и 100 мкм (3, 4) и нулевом поле остаточных напряжений при 20 (1, 3) и 1100°C (2, 4).

повышение температуры приводит к снижению уровня напряжений, что обусловлено температурной зависимостью свойств основного материала и деградированного слоя. В случае исходного состояния, определенного нулевым полем остаточных напряжений при 1100°C, максимальные уровни напряжений возникают при 100°C и с ростом температуры до 1100°C снижаются до нуля.

Анализ результатов экспериментальных исследований позволяет выделить три зоны изменения длины ( $l$ ) трещин, различающихся скоростью роста (рис. 8). Для первой зоны протяженностью примерно 20 мм характерны максимальные скорости развития трещин, что обусловлено более высокими напряжениями в материале и средней температурой в цикле. Для второй и третьей зон свойственно уменьшение интенсивности скорости развития трещин за счет снижения термонапряженности материала образца в направлении торцевых поверхностей, контактирующих со стенками испытательной камеры (рис. 5).

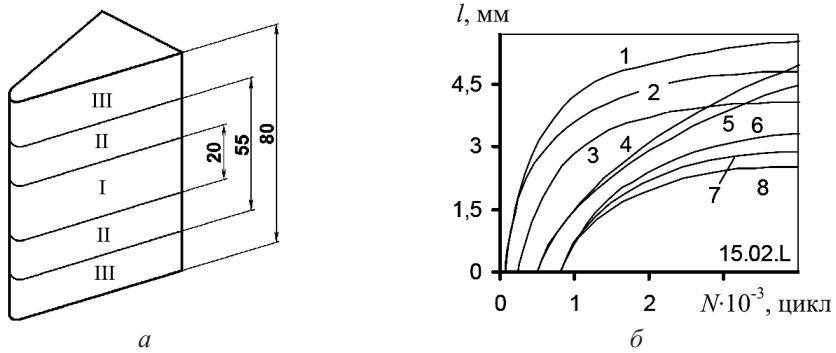


Рис. 8. Кинетика роста трещин термической усталости по высоте образца: а – зоны роста трещин с различной скоростью; б – кинетика роста трещин по зонам (1 –  $L = 36$  мм (I); 2 –  $L = 36$  мм (II); 3 –  $L = 36$  мм (III); 4 –  $L = 27$  мм (I); 5 –  $L = 27$  мм (II); 6 –  $L = 27$  мм (III); 7 –  $L = 20$  мм (I); 8 –  $L = 20$  мм (II)).

При термоциклировании на кромке лопатки ГТД и клиновидного образца на первом этапе возникает сетка коротких трещин. В процессе дальнейшего нагружения продолжается рост одной-трех макротрещин (рис. 9). Поэтому исследовали взаимное влияние трещин термической усталости в различных зонах кромки клиновидного образца, которые различались кинетикой повреждения деградированного слоя и термонапряженным состоянием материала. Были проведены численные расчеты и

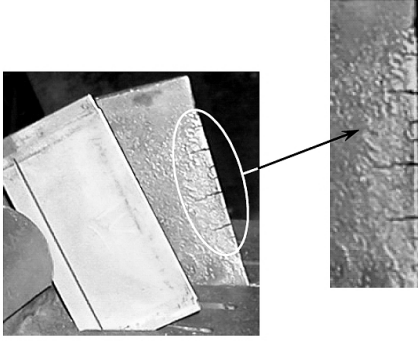


Рис. 9

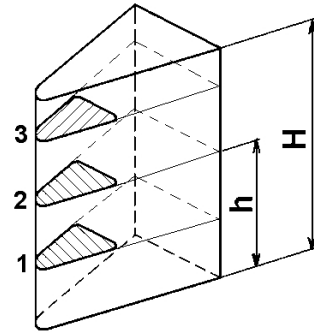


Рис. 10

Рис. 9. Характерная сетка термоусталостных трещин, возникающих на кромке образца.

Рис. 10. Расчетная модель клиновидного образца с тремя трещинами различной длины  $l$  на разном расстоянии от его торца  $h$ : 1 –  $h = 19,0$  мм и  $l = 1,7$  мм; 2 –  $h = 44,5$  мм и  $l = 4,0$  мм; 3 –  $h = 67,5$  мм и  $l = 2,0$  мм.

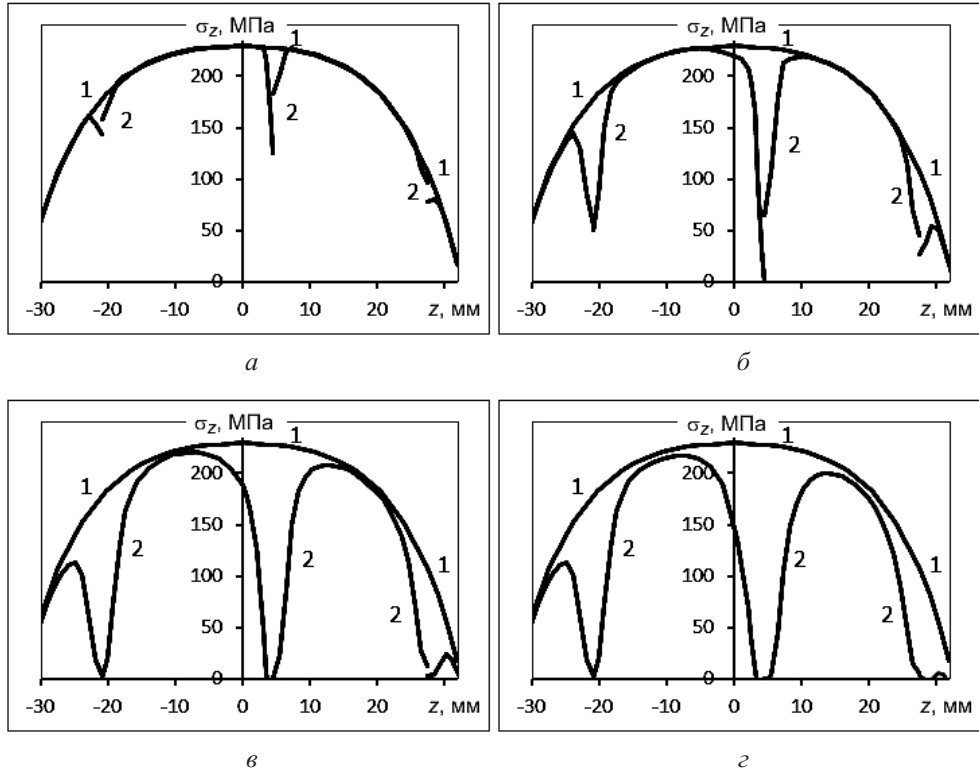


Рис. 11. Влияние трещин различной длины на напряженное состояние кромки: 1 – бездефектный образец; 2 – образец с трещинами (а –  $l_1 = l_2 = l_3 = 0,25$  мм; б –  $l_1 = l_2 = l_3 = 0,7$  мм; в –  $l_1 = l_2 = l_3 = 1,7$  мм; г –  $l_1 = l_2 = 1,7$  мм,  $l_3 = 2,0$  мм).

анализ ТНДС клиновидного образца в цикле теплового нагружения в разных зонах по высоте клина с учетом трещин, находящихся в этих зонах. На рис. 10 показана одна из расчетных моделей клиновидного образца с тремя трещинами.

Результаты расчетов (рис. 11) показывают, что изменение напряженного состояния кромки зависит от длины возникающих трещин, и снижение уровня напряжений

происходит на ограниченном участке кромки клина, а величина разгрузки материала зависит от длины трещины: чем больше длина трещины, тем ниже уровень напряжений в области трещины. Таким образом, возникновение двух-трех длинных трещин, расположенных на достаточном расстоянии одна от другой, оказывает локальное влияние на напряженное состояние образца. В то же время сетка коротких трещин, которые расположены достаточно близко одна к другой, приводит к разгрузке материала кромки образца.

## Выводы

1. На основании данных анализа теплового и напряженно-деформированного состояния клиновидного образца, моделирующего нагруженность кромки лопатки ГТД в процессе термоциклического нагружения в газовом потоке, показана принципиальная необходимость учета реального состояния материала наиболее нагруженных областей при определении работоспособности лопаточного аппарата турбины на различных стадиях эксплуатационного цикла и корректировки подходов (критериев) к оценке остаточного ресурса ГТД “по состоянию”.

2. Модифицированная методика расчетной оценки ТНДС, базирующаяся на экспериментальных данных о кинетике теплового состояния клиновидного образца в цикле и физических исследованиях кинетики структурного состояния материала, позволяет проводить масштабные численные исследования с учетом значимости деградированных слоев и образовавшихся трещин термической усталости.

3. Установлено существенное влияние механизмов и кинетики деградации свойств материала поверхностных слоев на напряженное состояние различных зон клиновидного образца, характер зарождения и роста трещин термической усталости в зависимости от уровня повреждения. Представленные результаты исследований позволяют количественно оценить влияние размеров, локализации и кинетики роста трещин термической усталости на изменение НДС конструкции (образца) в целом и показать, что напряжения, вызванные образованием деградированного слоя, вносят существенный вклад в ее напряженное состояние и должны учитываться при расчетах, связанных с определением прочности и долговечности элементов конструкций.

4. Результаты расчетов свидетельствуют о необходимости проведения исследований по оценке свойств материала деградированного слоя и совершенствованию методологических подходов, связанных с определением реальных полей остаточных напряжений в элементе конструкции, обусловленных эксплуатационными и технологическими факторами.

## Резюме

Проаналізовано тепловий і напружено-деформований стан клиновидного зразка, що моделює стан матеріалу кромки лопатки газотурбінного двигуна, у процесі термоциклічного навантаження у газовому потоці. Показано суттєвий вплив механізмів і кінетики деградації властивостей матеріалу поверхневих шарів на напружений стан різних зон клиновидного зразка, характер зародження і ріст тріщин термічної втоми в залежності від рівня пошкодження. Представлено результати дослідження впливу розмірів, локалізації й кінетики росту тріщин термічної втоми на зміну напружено-деформованого стану конструкції (зразка) в цілому.

1. Третьяченко Г. Н., Кравчук Л. В., Куриат Р. И. и др. Термическая усталость материалов в условиях неоднородного термонапряженного состояния. – Киев: Наук. думка, 1985. – 278 с.



2. Гецов Л. Б. Материалы и прочность деталей газовых турбин. – М.: Недра, 1996. – 591 с.
3. Богуслаев В. А., Муравченко Ф. М., Жеманюк П. Д. и др. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД, ч. 2: Лопатки турбины. – Запорожье: ОАО “Мотор Сич”, 2003. – 396 с.
4. Matsubara G. and Nishio K. Multiaxial high-cycle fatigue criterion considering crack initiation and non-propagation // *Int. J. Fatigue*. – 2013. – 47. – P. 222–231.
5. Hu X. F. and Yao W. A. A new enriched finite element for fatigue crack growth // *Ibid.* – 48. – P. 247–256.
6. Kravchuk L. V., Kuriat R. I., Buiskikh K. P., et al. Investigation of the kinetics of damage to refractory alloys under cyclic thermal loading in a gas flow // *Strength Mater.* – 2006. – 38, No. 4. – P. 386–391.
7. Kravchuk L. V., Kuriat R. I., Buiskikh K. P., et al. Degradation of the surface layers of superalloys and thermal-fatigue damage to the structural elements of gas-turbine engines // *Ibid.* – 2008. – 40, No. 5. – P. 552–559.
8. Кравчук Л. В., Курият Р. И., Буйских К. П. Исследование механизмов термоусталостного повреждения материалов с покрытиями деталей ГТД // *Вестн. двигателестроения*. – 2009. – № 1. – С. 45–49.
9. Wang Q. M., Wu Y. N., Ke P. L., and Cao H. T. Hot corrosion behavior of AlP NiCoCrAlY (SiB) coatings on nickel-base superalloys // *Surf. Coat. Technol.* – 2004. – 186. – P. 389–397.
10. Трощенко В. Т., Кравчук Л. В., Кононченко О. В., Задворный Е. О. Кинетика тріщин втоми під циклічним термомеханічним навантаженням // *Физ.-хим. механика материалов*. – 2001. – 37, № 2. – С. 33–42.
11. Kravchuk L. V. and Zadvorny E. A. Investigation of thermal fatigue crack propagation kinetics in heatresistant materials under conditions of unsteady heat exchange using the methods of experimental and numerical simulation // *Proc. of the Third Int. Congr. on Thermal Stresses*. – Cracow (Poland), 1999. – P. 237–240.
12. Mazur Z., Luna-Ramirez A., Juarez-Islas J. A., and Campos-Amezcuca A. Failure analysis of a gas turbine blade made of inconel 738LC alloy // *Eng. Fail. Anal.* – 2005. – 12. – P. 474–486.
13. ДСТУ 23.6794. Єдина система захисту від корозії та старіння. Метали, сплави, покриття жаростійкі. Метод випробувань на високотемпературну корозію та термовтому в потоці продуктів горіння палива. – Чинний від 25.02.94.
14. Програмне забезпечення “Тривимірне скінченноелементне моделювання теплового і термонапруженого стану елементів машинобудівних конструкцій (SPACE)” / Система сертифікації УкрСЕПРО. Сертифікат відповідності № UA1.017.0084261-02. – 2002.

Поступила 06. 07. 2015