

Исследование кинетики повреждения жаропрочных сплавов при термоциклическом нагружении в газовом потоке

Л. В. Кравчук, Р. И. Куриат, К. П. Буйских, Е. А. Задворный, С. Г. Киселевская

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

Представлены результаты исследования кинетики повреждения конструкционных элементов из жаропрочных сплавов, в том числе с защитными покрытиями, при термоциклическом нагружении. Проанализировано влияние напряженно-деформированного состояния на развитие трещин в условиях термоусталостного нагружения.

Ключевые слова: жаропрочные сплавы, защитные покрытия, термоциклическое нагружение, кинетика повреждения, газовый поток.

Разработка научно обоснованных подходов и создание методов, способных реально учитывать кинетику повреждения материалов в процессе эксплуатации, является одной из актуальных задач при решении проблем обеспечения надежности, оценки остаточного ресурса и живучести элементов конструкций.

Основная цель данного исследования заключалась в изучении процессов, которые сопровождают зарождение и развитие трещин термической усталости при термоциклическом нагружении элементов конструкций из жаропрочных сплавов с защитными покрытиями и без них в высокотемпературном газовом потоке. В предложенной постановке работа имеет принципиальное значение для понимания механизмов распространения трещин при неизотермической нагрузке, обоснования возможности применения новых и известных моделей современной механики разрушения применительно к термической усталости конструкционных материалов указанных классов.

Отличие свойств защищаемого материала от свойств покрытия, а также неизбежное формирование особой переходной зоны на границе контакта покрытия и защищаемого материала требуют рассматривать систему основа-покрытие как конструкцию.

Трудноконтролируемое возникновение полей остаточных напряжений, низкая достоверность информации о характере изменений и свойствах материала основы в области переходной зоны существенно затрудняют корректную оценку реального напряженно-деформированного состояния (НДС) материала, обоснованный выбор критериев предельного состояния и долговечности покрытий.

При решении поставленных задач основными направлениями были: анализ и обобщение экспериментальных данных о механизмах термоусталостного повреждения разных материалов на стадии после возникновения термоусталостной трещины в зависимости от интенсивности термомеханической нагрузки и коррозионного влияния газового потока; исследование динамики теплового и напряженно-деформированного состояния материала при наличии трещины в процессе циклического нагружения эксперимен-

тальными методами и методами численного моделирования; изучение закономерностей распространения трещин термической усталости в сплавах с защитными жаростойкими покрытиями и направленно-кристаллизованных материалах; обоснование закономерностей, которые устанавливают связь между кинетикой повреждения и уровнем действующей нагрузки; обобщение полученных результатов с позиций механики разрушения; выработка рекомендаций по использованию методов для последующего прогнозирования долговечности элементов конструкций с трещинами термической усталости.

Анализ литературных источников показал, что различие между методами исследования повреждений элементов конструкций обусловлено большим многообразием специфических особенностей нагрева, механического нагружения и типов исследуемых образцов [1–6]. Различие между методами испытаний, формами и размерами образцов, типами покрытий, видами нагружения, способами определения условий разрушения приводит к существенному затруднению, а иногда и невозможности сопоставления известных из литературных источников данных и особенно количественной оценки воздействия различных факторов.

Известно, что повреждение жаропрочных сплавов при термоциклическом нагружении значительно зависит от структурного состояния сплава (величина зерна, характер расположения границ зерен, фазовый состав, кристаллографическая ориентация), наличия покрытий различного типа, температуры испытаний, величины действующих термических напряжений, скорости деформирования, агрессивной среды и других факторов.

Исходя из вышеизложенного исследование закономерностей повреждения жаропрочных сплавов проводилось путем моделирования реальных условий эксплуатации лопаток на натуральных образцах (рис. 1,а) и моделях (рис. 1,б) на газодинамическом стенде [7, 8]. Использование в качестве образца клиновидной призмы позволяет в процессе эксперимента воспроизводить реальную термонагруженность материала кромки лопатки ГТД при сравнительно простых процессах ее изготовления, испытаниях и последующих расчетах НДС.

Необходимые значения температуры и НДС материала кромки достигаются выбором геометрических размеров образца: угол раствора φ ; радиус скругления кромки r ; длина хорды L ; высота H (обозначение конкретного образца имеет запись вида: 15.07.32, где $\varphi = 15^\circ$, $r = 0,7$ мм, $L = 32$ мм). Использование многосекционных испытательных камер (рис. 1,в,г) позволяет путем подбора партии образцов с различными геометрическими характеристиками из одного эксперимента получать данные о зависимости долговечности от температуры и уровня максимальных термических напряжений.

Результаты испытаний по этим методикам были базовыми для получения нижеприведенных данных.

Исследовали характер и механизмы повреждения жаропрочных сплавов на никелевой основе (ЖС6У, ЖС6Ф, ЖС30, ЧС70) с различной кристаллической структурой: поликристаллическая, направленно-кристаллизованная (НК) и монокристаллическая как без покрытий, так и с защитными, в том числе и многослойными, покрытиями на основе никеля ($\text{Ni-Cr-Al-Y/ZrO}_2 + \text{Y}_2\text{O}_3$) и кобальта ($\text{Co-Cr-Al-Y/ZrO}_2 + \text{Y}_2\text{O}_3$) при высокотемпературном термоциклическом нагружении в газовом потоке.

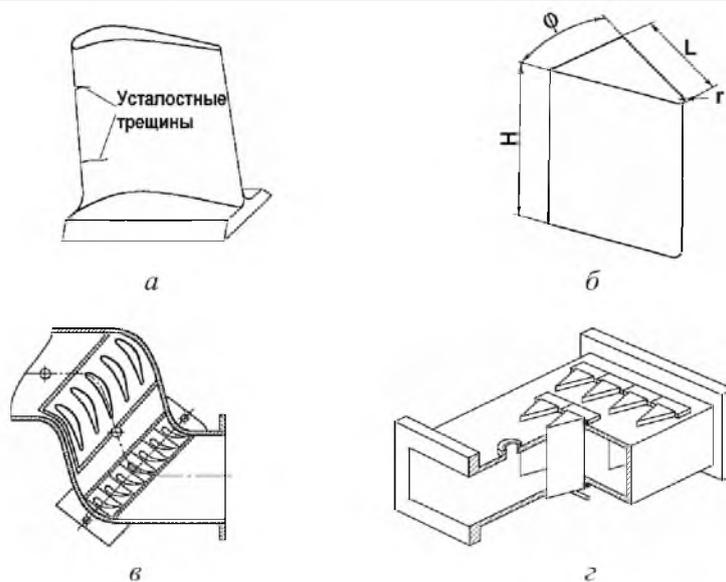


Рис. 1. Моделирование термонапряженно-деформированного состояния (ТНДС) материала кромочной части лопатки на клиновидных образцах: *a* – лопатка; *б* – клиновидный образец; *в*, *г* – секции камеры для испытаний соответственно лопаток и клиновидных образцов.

Расчеты по определению пространственного теплового и напряженно-деформированного состояния исследуемых образцов осуществляли с использованием пакета прикладных программ “SPACE” [9].

Учитывая симметрию рассматриваемого клиновидного образца, все последующие расчеты проводили для четверти клина. По результатам термометрирования путем решения прямой и обратной задач теплопроводности в двухмерной постановке для фиксированных моментов времени определяли граничные условия третьего рода. Методами экстраполяции и интерполяции строили обобщенные распределения коэффициентов теплообмена по поверхности рассмотренных моделей для различных временных интервалов. Эти распределения и экспериментальные данные об изменении температуры газового потока в цикле являлись базовыми для проведения расчетов.

Исследования механизмов повреждения сплавов без покрытий и с защитными покрытиями расчетным и экспериментальными физическими методами показали, что возможное изменение кинетики накопления усталостных повреждений материала с защитным покрытием по сравнению с незащищенным материалом может быть обусловлено тем, что теплозащитное покрытие при нестационарном нагреве оказывает значительное влияние на тепловое и напряженно-деформированное состояние материала в наиболее термонагруженной области. Это, в свою очередь, может существенно влиять на процесс упругопластического деформирования материала, определяющего исчерпание несущей способности элемента конструкции при циклическом нагружении в неизотермических условиях.

Термоусталостное поведение жаропрочных сплавов связано с их структурой, в частности, в термонагруженной области клиновидного образца. Межзеренные границы выступают в качестве структурного фактора, кото-

рый снижает сопротивление термосиловому нагружению и способствует росту термоусталостных трещин. Как видно из рис. 2, характер распространения термоусталостных трещин на границе и внутри зерна существенно различается. На поперечных границах зерен образцов из сплава ЖС6Ф трещины образуются после 200 цикл (практически мгновенно) с начальной фиксированной длиной $l = 7$ мм, затем их рост с достаточно высокой скоростью происходит до длины $l = 10$ мм (на рис. 2 кривая 1). Зарождение трещин внутри зерна начинается после 1500 цикл от $l = 0,5$ мм, и их рост с более высокой скоростью происходит до $l = 6$ мм.

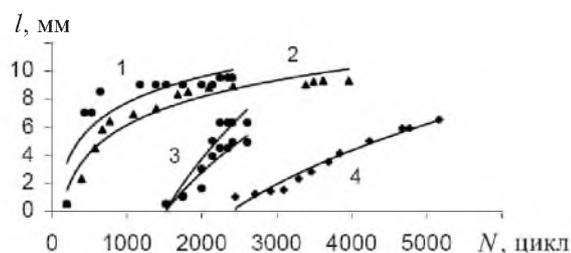


Рис. 2. Кинетика трещин термической усталости сплава ЖС6Ф при $T = 1020^{\circ}\text{C}$, $2\sigma_a = 400 \dots 500$ МПа на границе (1, 2) и внутри (3, 4) зерна: 1, 3 – образец без покрытия; 2, 4 – образец с двухслойным покрытием.

Трещина на границе зерна сплава с покрытием появляется после 570 цикл, при этом характер распространения трещин в образцах с покрытием и без покрытия подобен (на рис. 2 кривая 2). Внутризеренные трещины на сплаве с покрытием возникают после 2500 цикл и растут более медленно по сравнению с трещинами на сплаве без покрытия. Установлено, что внутри трещин скапливаются продукты коррозии, которые имеют такой же химический состав, что и поверхностная окалина. На рис. 3 показана зона межзеренной трещины до испытаний и после 2500 цикл с продуктами коррозии по ее берегам. Попадая через трещину в глубь металла, они инициируют расклинивающий эффект. Аналогичное разрушение наблюдается также при наличии покрытия.

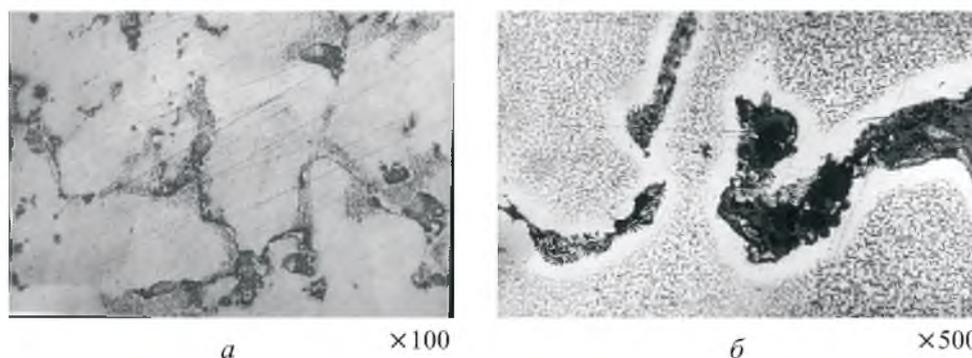


Рис. 3. Микроструктура сплава ЖС6Ф при $T = 1020^{\circ}\text{C}$, $\sigma_{\max} = 300$ МПа: а – исходное состояние; б – после 2500 цикл.

Существенное влияние на теплозащитное покрытие оказывают термические напряжения. На рис. 4 приведены микроструктуры покрытия типа Ni–Cr–Al–Y/ZrO₂+8%Y₂O₃ на сплаве ЖС30 после 4000 цикл при двух уровнях напряжений. При повышении уровня напряжений в диапазоне $\sigma_{\max} = 300 \dots 550$ МПа наблюдается коагуляция и перераспределение фаз металлических слоев, между керамическим и металлическим подслоем появляется зазор при сохранении сплошности керамики. Возможно, что потеря адгезионных свойств покрытия обусловлена изменением свойств оксида алюминия. Поскольку по направлению к поверхности покрытия имеет место интенсивная диффузия алюминия, при росте пленки оксида алюминия возникают напряжения, способствующие отслоению керамики. Обеспечение хорошей адгезии пленки оксида алюминия к поверхности очень важно для длительного сопротивления циклическому окислению [10–12].

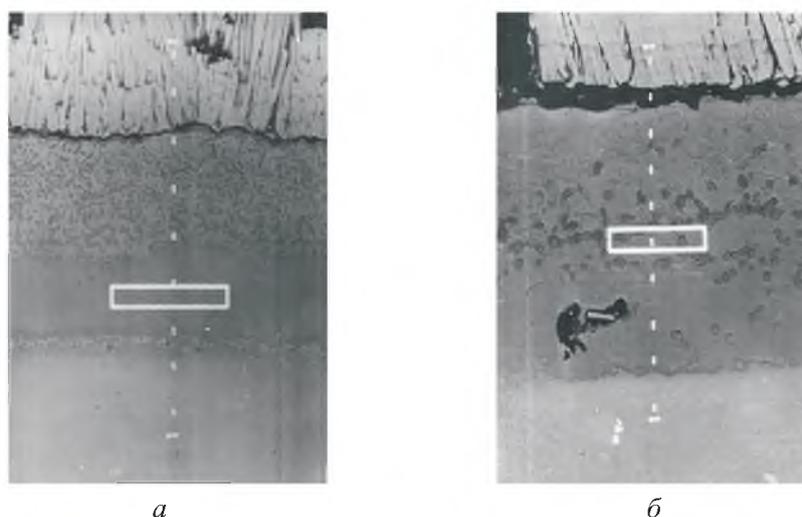


Рис. 4. Микроструктура теплозащитного покрытия на сплаве ЖС30 после 4000 цикл при $T = 1020^\circ\text{C}$ ($\times 500$): *a* – $\sigma_{\max} = 300$ МПа; *б* – $\sigma_{\max} = 550$ МПа.

При общей тенденции к улучшению работоспособности изделий с покрытиями в условиях теплосмен, когда в зависимости от сочетания различных факторов долговечность может увеличиваться в несколько раз, обнаруживается четко выраженная неоднозначность их влияния на ТНДС и обусловленная этим сложность ранжирования покрытий по критериям сопротивления термической усталости. При определенном сочетании факторов наблюдается как повышение, так и снижение долговечности конструкционного элемента. Практически во всех случаях имеет место значительный разброс данных. Достаточно четко это отмечается при анализе результатов исследования термоциклической долговечности сплавов с направленно-ориентированной структурой и многослойными покрытиями. Исследования, проведенные на сплавах ЖС6Ф, ЖС30, ЧС70ВИ, ЧС70НК, свидетельствуют о том, что дополнительными факторами разброса данных по долговечности являются ориентировка кристаллов, их положение и распределение в области максимальной термонагруженности материала образца [13].

В зависимости от толщины покрытия и уровня тепловых потоков возможно снижение пиковой температуры материала при неизоотермических процессах до 50...100 град. Более существенным является влияние покрытий и их толщины на термонапряженное состояние материала в области концентрации напряжений (кромка лопатки, образца) [14]. В качестве примера на рис. 5 показано изменение термических напряжений в материале основы на кромке клиновидного образца с покрытиями различной толщины.

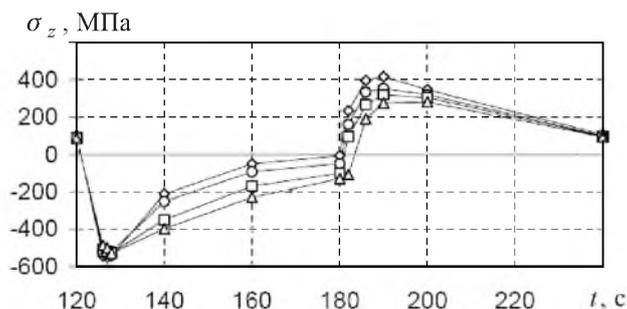


Рис. 5. Изменение термических напряжений σ_z в материале основы на кромке клиновидного образца с покрытиями различной толщины s : \diamond – $s = 0$; \circ – $s = 100$ мкм; \square – $s = 200$ мкм; \triangle – $s = 300$ мкм.

Поскольку информация о физических характеристиках материала покрытий ограничена и степень ее достоверности невысока, было исследовано влияние отклонений характеристик материала покрытий от принятых при расчете термонапряженного состояния на рассчитываемые значения остаточных и термических напряжений. В качестве примера использовали электронно-лучевое покрытие Ni–Co–Cr–Al–Y, коэффициент термического расширения и модуль упругости которого уменьшались и увеличивались по сравнению с начальными значениями на 15%. Изменение характеристик покрытия существенно влияет как на остаточные, так и на инициируемые при испытаниях термические напряжения.

В процессе исследования кинетики трещин термической усталости обнаружены определенные особенности процессов зарождения и последующего роста термоусталостных трещин в зависимости от уровня температур, термических напряжений, формы и размера образца. В связи с этим методами численного конечноэлементного анализа с привлечением подходов механики разрушения проведена оценка влияния возникающих трещин в покрытии как концентратора напряжений на термонапряженное состояние материала основы и живучесть конструкции. Оценочный расчет изменения коэффициентов интенсивности напряжений (КИН) для образца без покрытия и с покрытием Ni–Co–Cr–Al–Y толщиной 100 мкм в зависимости от длины магистральной трещины в срединной плоскости образца осуществлен для клиновидной модели со следующими геометрическими параметрами: $r = 0,7$ мм, $\varphi = 15^\circ$, $L = 43$ мм, $H = 80$ мм. Изменение термических напряжений во времени на кромке клиновидного образца и максимальных значений КИН по фронту трещины для образца 15.07.43 с учетом остаточных напряжений показано на рис. 6.

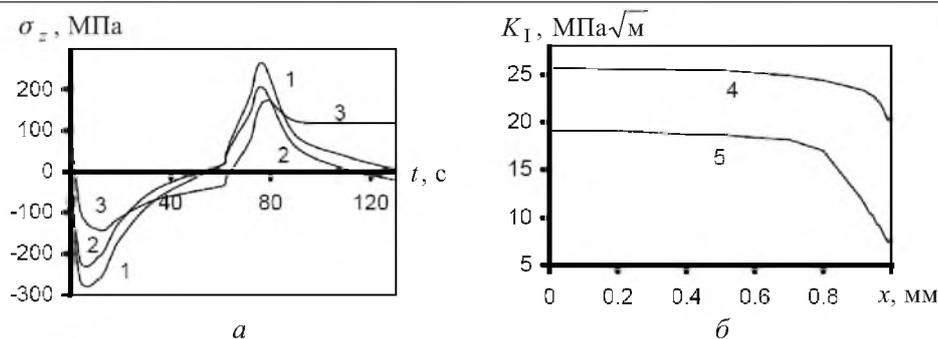


Рис. 6. Изменение термических напряжений σ_z во времени на кромке клиновидного образца (а) и максимальных значений КИН по фронту трещины (б) для образца 15.07.43 без покрытия и с покрытием Ni–Co–Cr–Al–Y: 1 – напряжения на кромке образца без покрытия; 2 – напряжения на кромке образца в основе под покрытием; 3 – напряжения на кромке образца в покрытии; 4, 5 – КИН в образце соответственно без покрытия и с покрытием.

Анализ полученных данных свидетельствует о том, что благодаря применению покрытия уровень КИН в вершине подрастающей трещины снижается, а следовательно, увеличивается живучесть конструкции в целом.

Основываясь на результатах экспериментального исследования кинетики повреждения жаропрочных сплавов при термоциклическом нагружении в коррозионной среде и используя разработанные методы математического моделирования, можно количественно оценить роль отдельных факторов, в том числе структурных изменений материала в окрестности трещин, и их влияние на живучесть элемента конструкции.

Резюме

Представлено результати дослідження кінетики пошкодження конструкційних елементів із жароміцних сплавів, у тому числі із захисними покриттями, при термоциклічному навантаженні. Проаналізовано вплив напружено-деформованого стану на розвиток тріщин в умовах термоутомного навантаження.

1. Биргер И. А., Шорр Б. Ф., Демьянушко И. В. и др. Термопрочность деталей машин. – М.: Машиностроение, 1975. – 455 с.
2. Гецов Л. Б. Материалы и прочность деталей газовых турбин. – М.: Недра, 1996. – 591 с.
3. Дульнев Р. А., Котов П. И. Термическая усталость материалов. – М.: Машиностроение, 1980. – 200 с.
4. Туляков Г. А. Термическая усталость в теплоэнергетике. – М.: Машиностроение, 1978. – 199 с.
5. Поспишил Б., Квитка А. Л., Третьяченко Г. Н. и др. Прочность и долговечность элементов энергетического оборудования. – Киев: Наук. думка, 1987. – 216 с.

6. *Сопротивление материалов деформированию и разрушению: Справочное пособие в 2 т. / Под ред. В. Т. Трощенко.* – Киев: Наук. думка. – 1993. – Т. 1. – 288 с.
7. *Третьяченко Г. Н., Кравчук Л. В., Куриат Р. И. и др.* Термическая усталость материалов в условиях неоднородного термонапряженного состояния. – Киев: Наук. думка, 1985. – 280 с.
8. *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 / Л. В. Кравчук, Г. Р. Семенов, Р. І. Куриат та ін. – Введ. 25.02.94. – 27 с.
9. *Програмне забезпечення “Тривимірне скінченноелементне моделювання теплового і термонапруженого стану елементів машинобудівних конструкцій (SPACE)” // Система сертифікації УкрСЕПРО.* – Сертифікат відповідності № UA1.017.0084261-02. – 2002.
10. *Smialek J. L.* Advances in the oxidation resistance of high-temperature turbine materials // *Surface and Interface Analysis.* – 2001. – **31** (7). – P. 582 – 592.
11. *Sarioglu C., Stiger M. J., Blachere J. R., et al.* The adhesion of alumina films to metallic alloys and coatings // *Materials and Corrosion.* – 2000. – **51** (5). – P. 358 – 372.
12. *Smialek J. L.* Maintaining adhesion of protective Al₂O₃ scales // *J. Minerals, Metals & Materials Society.* – 2000. – **52** (1). – P. 22 – 25.
13. *Куриат Р. И., Буйских К. П., Киселевская С. Г.* Исследование повреждаемости и кинетики трещин термической усталости применительно к конструкционным элементам ГТД // *Вибрации в технике и технологиях.* – 2001. – № 5 (21). – С. 37 – 39.
14. *Кобельский С. В., Куриат Р. И., Кравченко В. И., Квитка А. Л.* Численное моделирование термонапряженного состояния моделей лопаток ГТД с теплозащитными покрытиями и оценка их ресурса: Тр. Междунар. конф. “Оценка и обоснование продления ресурса элементов конструкций”. – Киев, 2000. – **2**. – С. 795 – 800.

Поступила 04. 11. 2005