

УДК 621.793 + 539.4.014.1 + 519.6

ОЦЕНКА НДС И АДГЕЗИОННОЙ ПРОЧНОСТИ В СИСТЕМЕ «ЖАРОПРОЧНЫЙ МАТЕРИАЛ – ПОКРЫТИЕ» В СЛУЧАЕ ПОДЛОЖКИ НЕКАНОНИЧЕСКОЙ ФОРМЫ*

Нуштаев Д.В.¹, Астапов А.Н.²¹Общество с ограниченной ответственностью «Тесис», г. Москва, Россия²Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Построена математическая модель на базе метода конечных элементов для оценки напряженно-деформированного состояния при тепловом нагружении системы «подложка – покрытие» с учетом особенностей деформирования подложки неканонической формы. Решена односвязная задача термоупругости в постановке для обобщенной плоской деформации в САЕ-системе SIMULIA Abaqus. В качестве подложки неканонической формы рассмотрена лопатка авиационного газотурбинного двигателя. Получено неравномерное распределение тепловых напряжений в системе по периметру профиля лопатки. В точках перехода пологих участков профиля к криволинейным (к кромке) выявлены скачки напряжений. Определена область применимости широко используемой на практике аналитической безмоментной модели при оценке напряжений в системе «подложка – покрытие» – прямолинейные, пологие участки подложки относительно больших толщин. При исследовании напряженно-деформированного состояния многослойных тонкостенных конструкций сложной геометрии велико влияние изгибных деформаций и кривизны системы.

Разработана методика определения уровня нормальных и сдвиговых контактных напряжений, инициирующих адгезионное разрушение в системе «подложка – покрытие». Для выбранной конфигурации лопатки и принятых свойств материалов слоев определены наиболее вероятные области и температуры начала разрушения адгезионной связи на отрыв и сдвиг. Дана оценка требуемого уровня прочности сцепления покрытия с подложкой, обеспечивающего сохранение целостности системы в рассмотренных условиях эксплуатации.

Прогнозирование уровня, характера распределения напряжений и адгезионной прочности в системе «подложка – покрытие» позволяет научно подойти к разработке архитектуры покрытий (выбору химического и фазового состава слоев, их количества, толщин и способов формирования), а также существенно сократить объем экспериментальных исследований и испытаний, время и затраты на их реализацию.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние; тепловые напряжения; остаточные напряжения; многослойная система; подложка; функциональное покрытие; адгезионная прочность; метод конечных элементов; упругая модель; лопатка газотурбинного двигателя

* Работа выполнена в рамках гранта РНФ по мероприятию «Проведение инициативных исследований молодыми учеными» Президентской программы исследовательских проектов (Соглашение № 17-79-10325 от 25.07.2017 г.).

STRESS STATE AND ADHESION STRENGTH ESTIMATES FOR THE SYSTEM OF A HEAT PROOF MATERIAL AND A HEAT PROTECTION COATING FOR NON-CANONICALLY SHAPED SUBSTRATES

Nushtaev D.V.¹, Astapov A.N.²

LTD «Tesis», Moscow, Russia

¹ *Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia*

ABSTRACT

A new finite element – based numerical model for the stress-strain state estimation in a heat loaded system of a coating and a non-canonically shaped substrate is proposed to investigate the coating protection of gas turbine blades. An once coupled plane problem of thermoelasticity is solved using the CAE system SIMULIA Abaqus. The non-homogeneous distribution of the heat-induced stresses in the system around the blade profile periphery is obtained and the stress jumps at the points of connection of shallow profile segments to the highly curved ones are found. It is shown that the well-known analytical model neglecting bending moments is useful for straight or slightly curved segments of boundaries of relatively thick substrates, otherwise this estimate fails. The bending strains and curvatures effect strongly on the stress-strain state of laminated structures of complex shape.

The new method of estimation of normal and shear contact stresses inducing the adhesion failure in the coating – substrate system is proposed. The most probable zones and temperatures of the failure initiation of the adhesion bound are obtained for the blade geometry and material properties. The required level of the adhesion strength for the coating – substrate system is estimated for the given operation conditions of the turbine blade.

The prognosis of the level and the distribution of stresses and adhesion strength in various coating – substrate systems offers the basis of the design of coating architectures as well as their (chemical compositions, phase constitutions, number and thickness of layers), and the forming methods. As a result, the number and the costs of physical tests can be significantly reduced.

Keywords: stress and strain state; heat induced stresses; residual stresses; multilayer systems; substrates; functional coatings; adhesion strength; finite element simulation; elastic model; gas turbine blade

ВВЕДЕНИЕ

С развитием техники повышается спрос на конструкционные материалы, способные работать в агрессивных средах под нагрузкой и при высоких температурах. Однако даже самые лучшие из известных в настоящее время материалов, обладая необходимой механической прочностью, нуждаются в обеспечении требуемыми функциональными свойствами (износостойкость, коррозионная стойкость, жаростойкость, термостойкость, стойкость к эрозионному уносу, каталитическая активность и пр.). Эти задачи решаются в основном с помощью тонкослойных защитных покрытий [1-6], наносимых на поверхность деталей, находящихся в контакте с окружающей средой.

При переходе от основного (несущего) материала к наслоенному покрытию неизбежно возникает скачок или градиент свойств, в частности, коэффициента температурного линейного расширения (КТЛР), в результате чего в многослойной системе появляются внутренние напряжения [1,3,7-9]. Они приводят к снижению адгезионной прочности сцепления, к увеличению скорости разрушения покрытий

в процессе эксплуатации, особенно в местах с малым радиусом закругления поверхностей (на острых кромках, зонах изменения геометрии). Центральным вопросом в поиске оптимальной архитектуры покрытия является связь структурных параметров системы «подложка – покрытие» (количество и толщина слоев), механических и теплофизических свойств материалов слоев с функциональными и эксплуатационными характеристиками системы. Критерием выбора параметров структуры покрытия и материалов его слоев, как правило, выступает минимизация напряжений (остаточных, термических), возникающих в многослойной системе при ее получении и в процессе эксплуатации.

Анализ напряженно-деформированного состояния (НДС) покрытий на плоских подложках при тепловом воздействии показал [1,7-9], что напряжения сжатия, превышающие допустимый предел, ведут к отрыву слоев покрытий друг от друга или от основы, а напряжения растяжения – к образованию в них микропор и трещин. На подложках с кривизной в слоях покрытий появляются дополнительные отрывающие или прижимающие усилия, действующие нормально к поверхности (радиальные напряжения). Причем результат действия этих напряжений будет зависеть, прежде всего, от соотношения КТЛР материалов слоев покрытий и подложки и типа кривизны последней (вогнутость, выпуклость).

Аналитический расчет НДС покрытий на неплоских подложках простой геометрической формы (полый шар, цилиндрическая труба) в безмоментной постановке (без учета изгибных деформаций) дан в работах [1,10]. Однако, в работах [7-9] показано, что исследование НДС без учета изгиба приводит к недопустимым погрешностям даже в простейшем случае полубесконечной пластины, не говоря уже о подложках с кривизной. Вклад изгибной составляющей в общее НДС многослойных систем особенно возрастает при рассмотрении тонкостенных конструкций, характерных, прежде всего, для изделий авиационной и ракетно-космической техники.

Для учета реальной геометрической формы и размеров подложек, а также особенностей их деформирования, в том числе связанных с изгибом, в мировой практике широко используется метод конечных элементов (МКЭ). В частности, существует большое число работ в области моделирования НДС термобарьерных покрытий [11-20], в том числе, на цилиндрических подложках [11,14,15]. Основное внимание в них посвящено изучению эволюции термических напряжений в процессе эксплуатации в результате диффузионного формирования на границе раздела «термобарьерный слой – жаростойкий слой», так называемого термически выращенного оксида (*thermally-grown oxide*). В используемых моделях учитывается решающее влияние неровности контактной поверхности, в области которой образуется указанный оксидный слой и реализуется максимальная концентрация напряжений. Работы, направленные на моделирование НДС многослойных покрытий на подложках неканонической формы, немногочисленны [17-19], их результаты не формируют законченную методологию в области исследования.

Другим важным параметром качества покрытий является прочность их сцепления с подложкой [3,21,22]. Проведенный анализ показывает, что основными методами, применяемыми для определения адгезии, являются экспериментальные методы прямого отрыва покрытия от подложки (по клеевой, паяной или штифтовой методике) [3,21-25] и царапания (склерометрии) [22,26-

31]. При этом все испытания выполняют на плоских поверхностях образцов, исключая возможность учета влияния особенностей реальной геометрии многослойных конструкций на характеристики адгезионной прочности слоев.

Испытания на отрыв [3,21-25] осуществляют путем создания напряжений на границах раздела слоев покрытий друг с другом и с основным материалом. С этой целью к поверхности покрытия приклеивают или припаивают металлические стержни, к которым затем прикладывают растягивающее усилие. К недостатку данного метода следует отнести вероятность проникновения клея или припоя на границы раздела между слоями покрытия и подложкой, а, следовательно, возможность изменения характеристик сцепления. К тому же, статистика показала [3,21], что при нагружении отрыв часто происходит не только по поверхности раздела, но и по материалу покрытия. Такое разрушение наиболее вероятно при невысокой когезионной прочности покрытия и наличии в нем несплошностей. Обычно разрушение цилиндрического стыка начинается с периферии образца и затем распространяется на остальную площадь. Неравномерное разрушение поверхности покрытия, обусловленное одновременным действием не только нормальных, но и частично касательных напряжений, не позволяет получить истинные значения адгезионной прочности покрытия.

Метод царапания [22,26-31] основан на непрерывном нагружении покрытий алмазным индентором, горизонтально перемещающимся по поверхности образцов под постоянной или возрастающей нагрузкой. Анализ степени деградации структуры покрытий определяется микроскопически, а также при помощи регистрации сигналов акустической эмиссии, появляющихся при сцарапывании слоев [29]. Метод царапания является наиболее простым и быстрым способом качественной оценки адгезионных/когезионных характеристик покрытий, поэтому широко применяется на практике, особенно при проведении сравнительных исследований. Однако метод не позволяет получать достоверные количественные оценки исследуемых свойств. Как правило, когезионная прочность покрытия характеризуется величиной нижней критической нагрузки на индентор, при которой происходит сцарапывание слоя с образованием и развитием трещин. Верхняя критическая нагрузка, при которой покрытие или отдельный его слой начинает полностью отслаиваться от подложки или ниже лежащих слоев, соответствует адгезионной прочности. Рядом авторов предложены упрощенные модели [26-28], позволяющие пересчитать полученные значения критических нагрузок в напряжения, однако результаты таких расчетов дают завышенные значения исследуемых характеристик, поэтому могут быть использованы лишь для получения их оценок «сверху».

Для моделирования образования и распространения трещин, роста расслоений в реальных многослойных конструкциях ввиду сложности их геометрии, условий нагружения и закрепления наиболее подходящим инструментом опять же является МКЭ. Анализ наиболее распространенных подходов решения указанных задач [7,14,32-39] показал, что для моделирования процесса деламинации многослойных покрытий, в том числе высокотемпературных, наиболее практичным представляется использование технологии когезионных поверхностей (*cohesive surface*) [7]. Суть метода заключается во введении в зоне предполагаемого разрушения дополнительного контактного слоя. Жесткость контактного слоя формируется на основе жесткости контактирующих элементов по правилу смеси либо устанавливается

непосредственно исследователем. Образование и раскрытие трещины в системе наблюдается при достижении материалом адгезионного слоя своего предела прочности, который в свою очередь зависит от прочности материалов связываемых слоев. Следует подчеркнуть, что в отмеченных работах значительное внимание уделяется вопросам моделирования процессов инициирования и эволюции межслоевых повреждений в системе «подложка – покрытие» [7,14,35-39]. Работ, непосредственно направленных на прогнозирование характеристик адгезионной прочности слоев покрытий и установление связей между ними и архитектурой слоистых систем, нами не выявлено.

Таким образом, экспериментальная оценка адгезионных/когезионных характеристик покрытий позволяет контролировать их качество и оптимизировать технологические процессы получения покрытий по таким параметрам, как режимы формирования, способы подготовки поверхности подложки и т.д. Однако, на наш взгляд, более логичным является прогнозирование рассмотренных параметров качества покрытий (остаточные напряжения, адгезионная прочность) и ряда их эксплуатационных свойств еще на ранних стадиях принятия материаловедческо-технологических решений. Это позволит, с одной стороны, научно подойти к разработке архитектуры покрытий (выбору химического и фазового состава слоев, их количества, толщин и способов формирования), а с другой – существенно сократить объем экспериментальных исследований и испытаний, а, следовательно, время и затраты на их реализацию. В качестве основного инструментария при моделировании следует использовать МКЭ с целью максимального приближения вычислительного эксперимента к условиям реальной эксплуатации изделий с покрытиями.

Целью настоящей работы является разработка методики расчета НДС тонкослойных покрытий на подложках неканонической формы и определения уровня напряжений, инициирующих адгезионное разрушение в слоистых системах. Работа продолжает систематические исследования авторов, посвященные разработкам функциональных защитных покрытий [4-6 и др.], а также созданию и развитию математических моделей и методов [7-9,40 и др.] оценки их НДС.

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В настоящей работе покрытие будем рассматривать в составе единой с защищаемым материалом конструктивной стенки, представляющей собой многослойный пакет «подложка – покрытие». Такая модель позволяет варьировать набором требуемых свойств системы за счет рационального выбора материала основы и изменения состава, количества и толщины наносимых слоев покрытий. Каждый слой стенки, включая подложку, будем моделировать сплошной беспористой односвязной средой конечной толщины без учета особенностей реальной микроструктуры их материалов. Неоднородность структуры (гетерофазность, наличие включений, дефектов и пр.) будем учитывать опосредовано – через приведенные характеристики свойств материалов слоев. Предполагается, что суммарная толщина слоев покрытий, как минимум, на порядок меньше толщины подложки, т.е. покрытия представляются тонкослойными системами.

Ограничимся рассмотрением только однослойных жаростойких покрытий. Последние предназначены для защиты от высокотемпературной газовой коррозии

жаропрочных материалов (например, никелевых сплавов, легированных сталей и пр.) и расширения температурно-временных интервалов их работоспособности в кислородсодержащих средах. В дальнейших исследованиях планируется провести обобщение результатов работы на многослойные жаростойкие покрытия и распространить их на композиции иного функционального назначения.

Рассматривается процесс плавного охлаждения свободной от внешних усилий и закреплений подложки неканонической формы с нанесенным однослойным покрытием. Начальное и конечное значения температур составляют соответственно $T_0=1200^\circ\text{C}$ и $T_k=20^\circ\text{C}$. В качестве подложки неканонической формы выступает лопатка авиационного газотурбинного двигателя (ГТД), выполненная из поликристаллического жаропрочного никелевого сплава ЖС6У. На ее лицевую поверхность нанесено серийное жаростойкое алюминидное покрытие из сплава СДП-2 системы Ni-20Cr-12Al-0,5Y. Температурные зависимости механических и теплофизических свойств материалов слоев в интервале $20\div 1200^\circ\text{C}$ представлены в Табл.1.

Таблица 1.

Температурные зависимости свойств материалов слоев конструкционной стенки и коэффициенты детерминации моделей.

Свойства \ Слои	Подложка ЖС6У	Покрытие СДП-2	R^2 , подложка/покрытие
Модуль упругости $E(T)$, МПа	$-138,71 \cdot T + 270760$	$-0,018 \cdot T^2 - 6,155 \cdot T + 162810$	0,949 / 0,993
Коэффициент Пуассона $\nu(T)$	$3 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 + 3 \cdot 10^{-6} \cdot T + 0,313$	$3 \cdot 10^{-8} \cdot T^2 - 1 \cdot 10^{-6} \cdot T + 0,3168$	0,974 / 0,981
КТЛР $\alpha(T) \cdot 10^6$, $1/^\circ\text{C}$	$7 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 - 0,0006 \cdot T + 11,833$	$10,941 \cdot e^{0,0006 \cdot T}$	0,929 / 0,953

Температурные зависимости величин модулей упругости $E(T)$ и истинных КТЛР $\alpha(T)$ материалов слоев заимствованы из работы [41]. Для нахождения температурных зависимостей коэффициента Пуассона $\nu(T)$ материалов слоев проведен вычислительный эксперимент с последующей аппроксимацией расчетных значений. Моделирование свойств осуществляли, по аналогии с работой [42], методом термодинамического расчета равновесного состояния многокомпонентных систем – CALPHAD (CALculation of PHase Diagrams) в программном комплексе JMatPro. Расчеты выполняли для сплавов следующих химических составов, мас. %: Ni-5,4Al-9,8Co-9,0Cr-1,5Mo-1,0Nb-2,6Ti-10,3W-0,18C-0,04Zr-0,025B и Ni-20Cr-12Al. Аппроксимацию данных проводили средствами регрессионного анализа на базе табличного процессора MS Excel. Достоверность аппроксимации данных продемонстрирована в Табл.1 коэффициентом детерминации R^2 .

В начальном состоянии система имеет однородное поле температур с $T_0=1200^\circ\text{C}$. Предполагается, что при данной температуре конструкционная стенка находится в ненапряженном состоянии ($\sigma_{ij} = \varepsilon_{ij} = 0$). Это соответствует состоянию системы в процессе высокотемпературного отжига или эксплуатации. По мере охлаждения, в результате взаимного стеснения температурных деформаций слоев, возникающих вследствие различия в КТЛР подложки и покрытия, в системе появляются тепловые напряжения. Анализ их уровня

и характера изменения в зависимости от температуры будем выполнять на базе решения односвязной задачи термоупругости. Будем считать, что поле температур задано и однородно в каждой точке системы. В противном случае температурное поле находится из решения задачи теплопроводности с учетом контактных условий на границе слоев системы (равенство температур и тепловых потоков). Закон изменения температуры от T_0 до T_k принимаем линейным.

Решение задачи термоупругости будем проводить в 2D постановке, т.е. для одного из характерных поперечных сечений лопатки авиационного ГТД (рис.1). Геометрические размеры профиля: максимальное расстояние между крайними точками (хорда) $L_s=70$ мм; наибольшая высота (толщина) $h_s=3,5$ мм; радиус скругления носика (кромки) $r_s=0,34$ мм. Покрытие нанесено по всему периметру профиля равномерным слоем толщиной $h_l=100$ мкм. Нижние индексы, используемые в обозначениях величин, относящихся к слоям стенки: s – *substrate* (подложка), l – *layer* (слой покрытия).

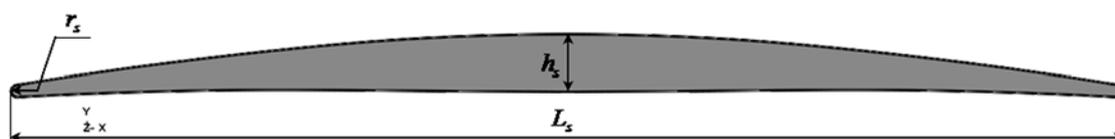


Рис.1. Профиль лопатки авиационного ГТД.

Разработку и реализацию методики расчета НДС будем осуществлять с применением МКЭ на базе прикладного программного комплекса SIMULIA Abaqus [43]. Подложка и покрытие моделируются как два отдельных геометрических объекта. Адгезионная связь между ними реализуется технологией *cohesive surface* [7,34,40], предполагающей определение контактных взаимодействий специального типа. Жесткость контактной связи формируется на основе жесткости связываемых конечных элементов по правилу смеси. В настоящей работе для описания механического отклика материалов подложки и покрытия используется упругая модель их деформирования, определяемая законом Гука-Дюамеля. Поэтому устанавливаемая контактная связь также является упругой. Следует отметить, что в данном исследовании НДС определяется с целью прогнозирования наиболее вероятных областей разрушения адгезионных связей в системе «подложка – покрытие». Непосредственное моделирование процессов зарождения трещин и их последующей эволюции не является предметом настоящей работы. Этим вопросам авторы посвятили отдельное исследование [7].

Построение конечно – элементной модели проводится с учетом геометрической симметрии профиля относительно оси OX . Задаются соответствующие граничные условия по границе выреза. Используются двумерные четырех узловые конечные элементы типа CPEG4R [9,43], работающие в режиме обобщенной плоской деформации ($\varepsilon_z = \text{const}$). По толщине покрытие аппроксимируется пятью конечными элементами. В окрестности адгезионного слоя со стороны подложки и кромки профиля лопатки применяется техника локального уплотнения сетки конечно-элементной модели (рис.2).

Температурные зависимости характеристик свойств материалов слоев стенки $E(T)$, $\nu(T)$, $\alpha(T)$ (Табл.1) будут приводить к изменению матрицы жесткости системы в течение расчета, т.е. к физической нелинейности. Исходя

из этого, в качестве метода решения нелинейной задачи выбран инкрементально-итерационный метод Ньютона-Рафсона [43], являющийся основой решателя Abaqus/Standard. Принят фиксированный размер приращения по температуре $\Delta T = 20^\circ\text{C}$.

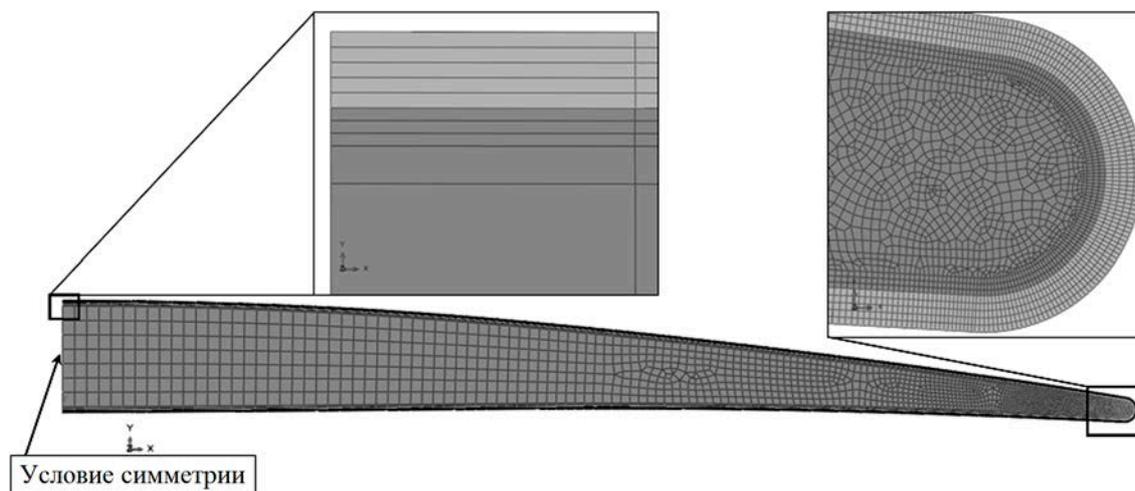


Рис.2. Конечно-элементная модель конструктивной стенки.

2. ОЦЕНКА НДС В СИСТЕМЕ «ПОДЛОЖКА – ПОКРЫТИЕ»

На основе построенной конечно-элементной модели были получены значения тепловых напряжений в подложке и покрытии при охлаждении конструктивной стенки. На рис.3 представлено распределение главных напряжений в системе при $T_k = 20^\circ\text{C}$. В теле лопатки зафиксированы растягивающие остаточные напряжения, в покрытии – сжимающие. Также на рисунке обозначены контрольные точки по периметру профиля, которые будут использоваться для последующего анализа НДС системы. Все точки находятся на границе раздела между подложкой и покрытием, т.е. в адгезионном слое системы: точки *A* и *G* – соответственно на верхней и нижней поверхности профиля на оси его симметрии; *B* и *F* – промежуточные точки на пологих участках профиля; *C* и *E* – точки перехода пологой части профиля к криволинейной и обратно (начало и окончание кромки); *D* – вершина кромки.

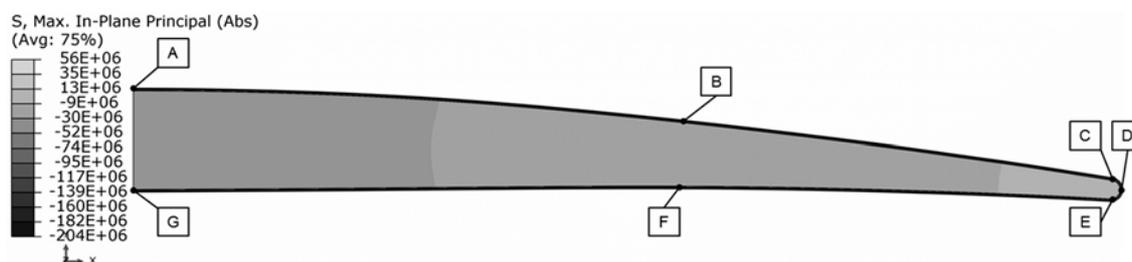


Рис.3. Распределение главных напряжений при $T_k = 20^\circ\text{C}$, Па и положение контрольных точек по периметру профиля.

На рис.4 приведены графики распределения главных напряжений в адгезионном слое ($T_k = 20^\circ\text{C}$) по периметру профиля, снятых с узлов покрытия (*layer*) и подложки (*substrate*) непосредственно прилегающих к границе раздела.

На участках AB , BC и GF , FE в покрытии наблюдается монотонное снижение сжимающих напряжений, в подложке – увеличение растягивающих. По мере удаления от оси симметрии профиля и приближения к кромке лопатки скорость изменения напряжений возрастает. В точках C и E отмечаются скачки напряжений, что связано с изменением радиуса кривизны профиля лопатки. В вершине кромки (точка D) падение сжимающих напряжений в покрытии максимально и составляет $\Delta\sigma_l^- = 34$ МПа. Максимум растягивающих напряжений в подложке приходится на точки C и E $\sigma_s^+ \approx 56$ МПа, далее по радиусу кромки напряжения снижаются вплоть до $\sigma_s^+ \approx 44$ МПа. Исходя из полученного характера распределения остаточных напряжений, температурные зависимости тепловых напряжений в слоях системы целесообразно исследовать в точках A , C и D .

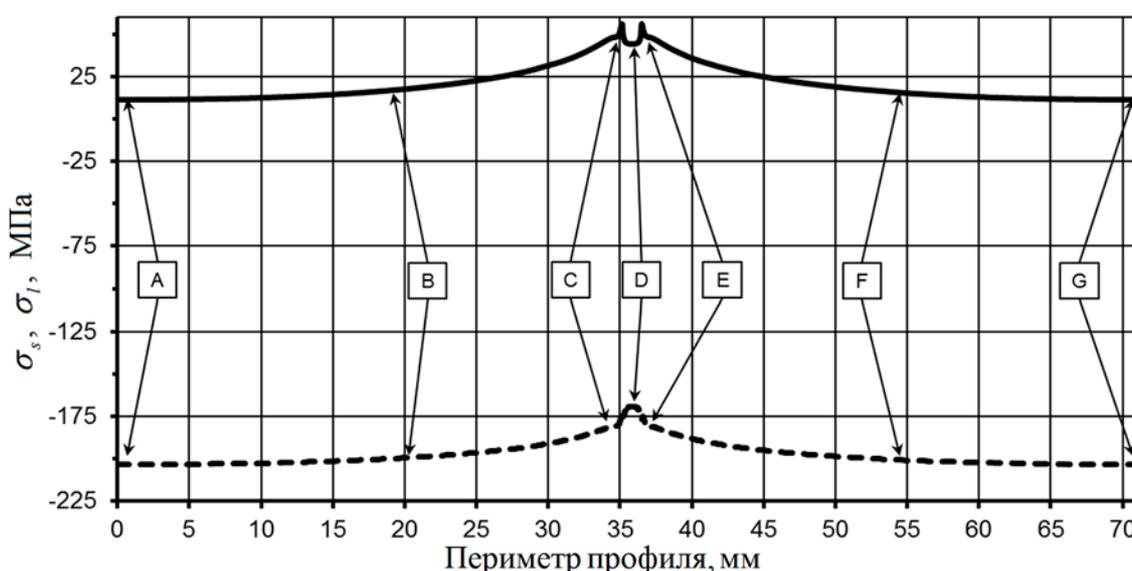


Рис.4. Изменение остаточных напряжений на границе раздела «подложка – покрытие» по периметру профиля, МПа: — — подложка; - - - - покрытие.

Характер температурной зависимости напряжений в покрытии и подложке на границе их раздела в точках A , C и D профиля лопатки представлен на рис.5 и 6, соответственно. Стремясь сузиться при охлаждении, покрытие сдерживает подложка ($\alpha_s < \alpha_l$ при $137,6^\circ\text{C} < T \leq 1200^\circ\text{C}$), в результате чего в нем создается растягивающая силовая деформация, компенсирующая температурное сужение. Поэтому начальному этапу охлаждения соответствует интенсивный рост растягивающих напряжений в покрытии и сжимающих в подложке. Своих максимальных значений они достигают при температуре $T \approx 500^\circ\text{C}$, которые составляют для покрытия $\sigma_l^+ = 228,9$ МПа (точка A), $\sigma_l^+ = 196,4$ МПа (точка C) и $\sigma_l^+ = 188,4$ МПа (точка D); для подложки – $\sigma_s^- = -13$ МПа (точка A), $\sigma_s^- = -58,2$ МПа (точка C) и $\sigma_s^- = -49,2$ МПа (точка D). Дальнейшее охлаждение приводит к снижению σ_l и σ_s . При $T = 137,6^\circ\text{C}$ система свободна от тепловых напряжений $\sigma_l = \sigma_s = 0$, т.к. $\alpha_s = \alpha_l$. После $T < 137,6^\circ\text{C}$ ($\alpha_s > \alpha_l$) в покрытии наблюдается рост сжимающих, а в подложке – растягивающих напряжений, которые при $T = 20^\circ\text{C}$ достигают следующих значений соответственно

$\sigma_l^- = -203,4$ МПа (точка *A*), $\sigma_l^- = -176,9$ МПа (точка *C*) и $\sigma_l^- = -169,2$ МПа (точка *D*); $\sigma_s^+ = 11,6$ МПа (точка *A*), $\sigma_s^+ = 53,3$ МПа (точка *C*) и $\sigma_s^+ = 44,4$ МПа (точка *D*). Подобное поведение объясняется сложными зависимостями КТЛР и механических характеристик материалов слоев от температуры (Табл.1).

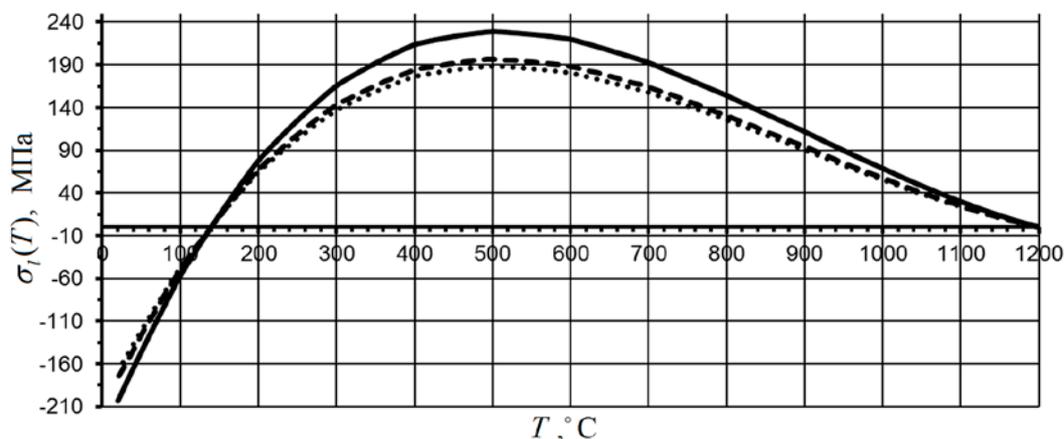


Рис.5. Температурные зависимости тепловых напряжений в покрытии, МПа: — — точка *A*; - - - - точка *C*; — точка *D*.

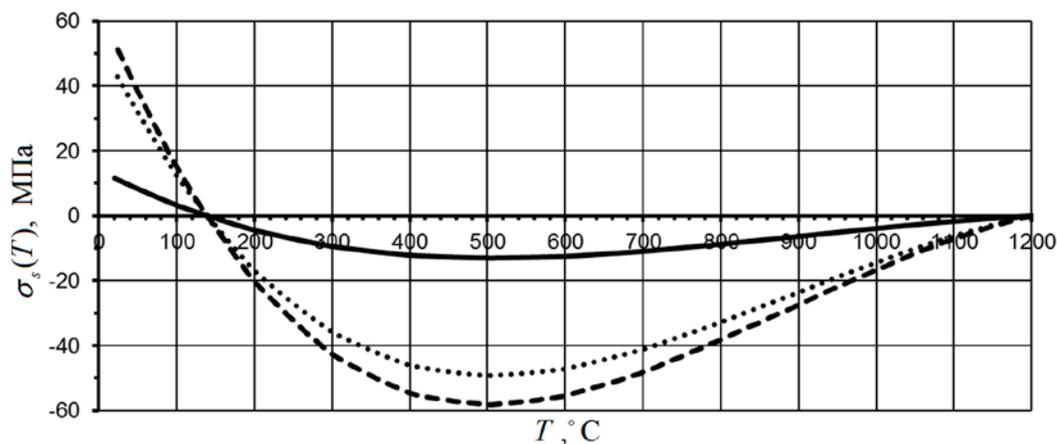


Рис.6. Температурные зависимости тепловых напряжений в подложке, МПа: — — точка *A*; - - - - точка *C*; — точка *D*.

Следует отметить, что полученные значения напряжений в точке *A* на пологом участке профиля в месте его наибольшей высоты хорошо коррелируют с результатами аналитических вычислений [9,40], выполненных нами в рамках широко используемой на практике безмоментной модели оценки НДС многослойных систем [1,41]. При переходе от пологих участков профиля к криволинейным (точки *C* и *D*) наблюдается снижение общего уровня тепловых напряжений в покрытии. Отмеченная разница достигает своего максимального значения при температуре $T \approx 500^\circ\text{C}$ и составляет порядка 40 МПа. Для подложки ситуация меняется в противоположную сторону – напряжения на кромке кратно превышают значения напряжений в точке *A*. Подобного рода поведение связано с увеличением вклада изгибного деформирования и кривизны при переходе от пологих участков профиля к криволинейным и одновременном уменьшении толщины подложки (см. рис.3).

Также выявлено значительное изменение градиента напряжений по толщине покрытия в зависимости от положения исследуемого участка на профиле лопатки. Так, градиент остаточных напряжений по толщине в точке *A* при $T_k=20^\circ\text{C}$ составляет порядка 0,1 МПа, а в точке *D* – порядка 40 МПа.

4. ОЦЕНКА АДГЕЗИОННОЙ СВЯЗИ В СИСТЕМЕ «ПОДЛОЖКА – ПОКРЫТИЕ»

Как было отмечено в п.1, адгезионная связь между подложкой и покрытием моделируется на основе контактных взаимодействий с введением упругой жесткости между контактирующими поверхностями. Оценку состояния адгезионной связи удобно проводить по уровню контактных напряжений в системе «подложка – покрытие». Проводится их разделение на нормальную и сдвиговую составляющие. Нормальные контактные напряжения (*CPRESS*) действуют по нормали к контактирующим поверхностям. Положительное значение этой величины соответствует сжатию контактирующих поверхностей по нормали, а отрицательное – отслоению. Сдвиговая составляющая контактных напряжений (*CSHEAR*) характеризует работу контактирующих поверхностей на сдвиг (относительное движение). Таким образом, в зоне отрицательных значений *CPRESS* следует ожидать отслоения покрытия по нормали (*Mode I*: разрушение на отрыв), а в зонах максимальных значений *CSHEAR* – по касательной (*Mode II*: разрушение на сдвиг).

На рис.7 и 8 представлены графики распределения нормальных и сдвиговых контактных напряжений в адгезионной связи между подложкой и покрытием по периметру профиля исследуемой лопатки ГТД при $T_k=20^\circ\text{C}$.

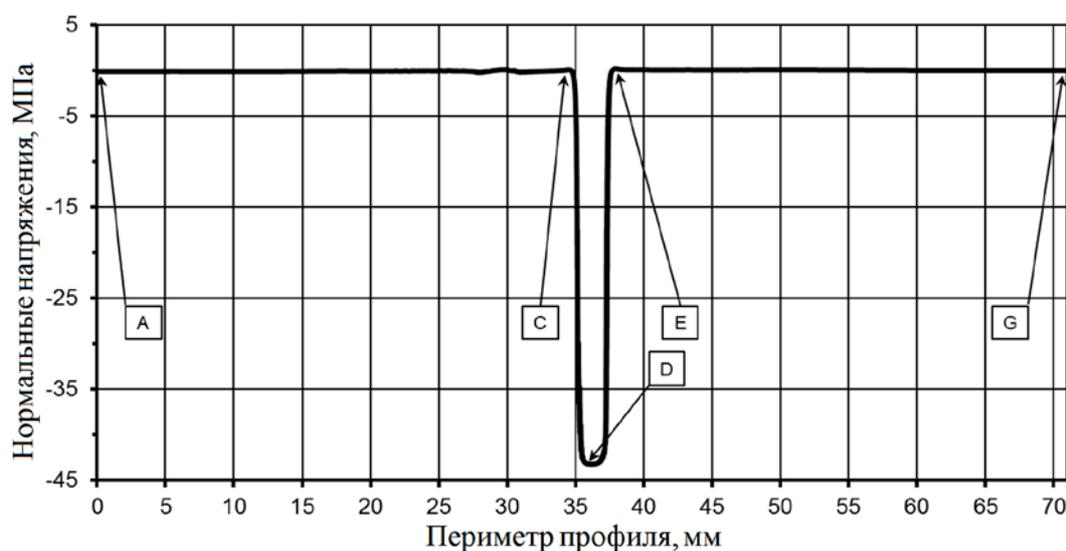


Рис.7. Распределение нормальных контактных напряжений *CPRESS* в системе «подложка – покрытие» по периметру профиля при $T_k=20^\circ\text{C}$, МПа.

На участках *AC* и *GE* величины *CPRESS* и *CSHEAR* имеют околонулевые значения. Исходя из этого, разрушение адгезионной связи на пологих участках профиля лопатки маловероятно. При переходе к кромке лопатки наблюдается резкое увеличение величины нормальных контактных напряжений с отрицательным знаком, что говорит о потенциальной возможности отрыва

покрытия от поверхности подложки. Своего максимального значения переменная $CPRESS$ достигает на вершине кромки (в точке D) и составляет 43 МПа. Величина $CSHEAR$ претерпевает скачок в точках C и E (начало и окончание кромки) и достигает значений 17,7 МПа.

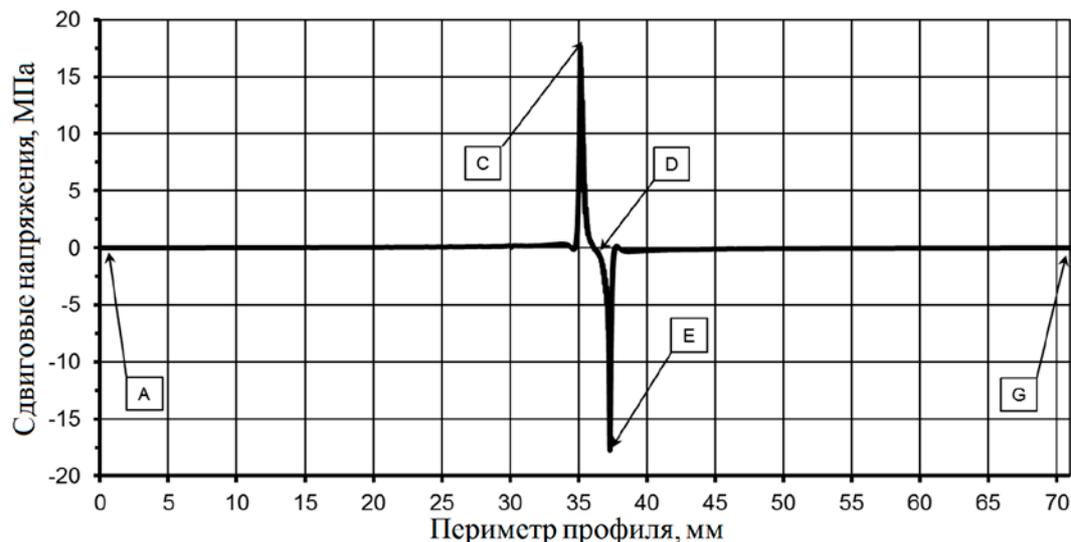


Рис.8. Распределение сдвиговых контактных напряжений $CSHEAR$ в системе «подложка – покрытие» по периметру профиля при $T_k = 20^\circ\text{C}$, МПа.

На рис.9 представлены температурные зависимости нормальных и сдвиговых контактных напряжений в точках D и E , в которых отмечены максимумы соответствующих переменных. При $T > 137,6^\circ\text{C}$ ($\alpha_s < \alpha_l$) переменная $CPRESS$ положительна, т.е. поверхность покрытия обжимает поверхность подложки, что не допускает разрушения адгезионной связи по нормали (отрыв).

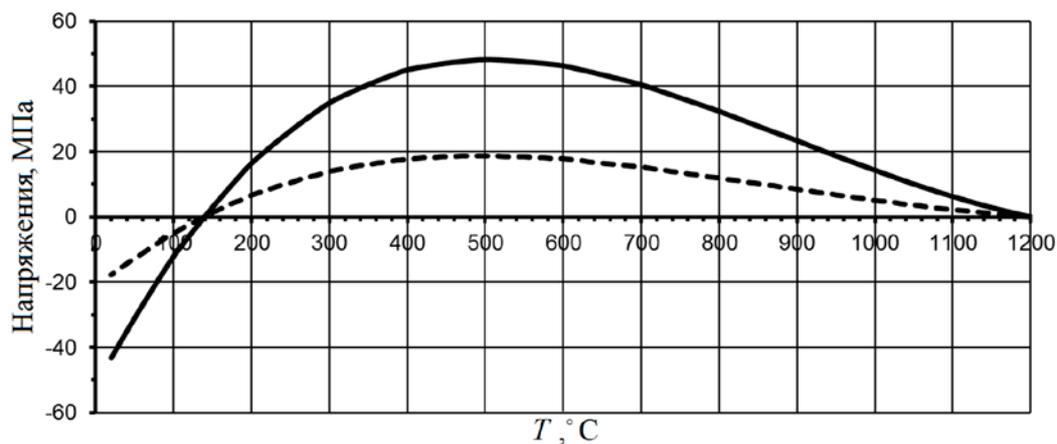


Рис.9. Температурная зависимость нормальных и сдвиговых контактных напряжений в системе «подложка – покрытие» в точках D и E , МПа: — — — — — нормальные напряжения, точка D ; - - - - - сдвиговые напряжения, точка E .

При $T < 137,6^\circ\text{C}$ ($\alpha_s > \alpha_l$) $CPRESS$ меняет знак, что создает предпосылки к возможному отрыву покрытия. Своего максимального значения переменная $CPRESS$ достигает при полном охлаждении стенки до $T_k = 20^\circ\text{C}$ и составляет

43 МПа. Знак переменной сдвиговых контактных напряжений (*CSHEAR*) не имеет роли при оценке возможности разрушения адгезионной связи на сдвиг – первостепенное значение имеет модуль данной переменной. Максимум переменной *CSHEAR* приходится на температуру $T \approx 500^\circ\text{C}$ и составляет 18,7 МПа. Таким образом, разрушение адгезионной связи на сдвиг наиболее вероятно именно при данной температуре ($T \approx 500^\circ\text{C}$), а не на конечном этапе охлаждения $T_k = 20^\circ\text{C}$.

Итак, исходя из проведенных оценок уровня нормальных и сдвиговых контактных напряжений в адгезионной связи, для выбранной конфигурации лопатки ГТД и принятых свойств материалов слоев адгезионная прочность системы «подложка – покрытие» на отрыв должна превышать величину 43 МПа, а на сдвиг 18,7 МПа.

ВЫВОДЫ

1. Построена математическая модель на базе МКЭ для оценки НДС при тепловом нагружении системы «подложка – покрытие» с учетом особенностей деформирования подложки неканонической формы. Решена односвязная задача термоупругости в постановке для обобщенной плоской деформации в САЕ-системе SIMULIA Abaqus. В качестве подложки неканонической формы рассмотрена лопатка авиационного ГТД. Получено неравномерное распределение тепловых напряжений в системе по периметру профиля лопатки. В точках перехода пологих участков профиля к криволинейным (к кромке) выявлены скачки напряжений.
2. Определена область применимости широко используемой на практике аналитической безмоментной модели при оценке НДС в системе «подложка – покрытие» – прямолинейные, пологие участки подложки относительно больших толщин. При исследовании НДС в многослойных тонкостенных конструкциях сложной геометрии велико влияние изгибных деформаций и кривизны системы. В области кромки лопатки выявлен существенный градиент напряжений по толщине покрытия, отсутствующий в нем на пологих участках системы.
3. На основе технологии *cohesive surface* разработана методика определения уровня нормальных и сдвиговых контактных напряжений, инициирующих адгезионное разрушение в системе «подложка – покрытие». Для выбранной конфигурации лопатки и принятых свойств материалов слоев определены наиболее вероятные области и температуры начала разрушения адгезионной связи на отрыв и сдвиг. Дана оценка требуемого уровня прочности сцепления покрытия с подложкой, обеспечивающего сохранение целостности системы в рассмотренных условиях эксплуатации.
4. Прогнозирование уровня, характера распределения напряжений и адгезионной прочности в системе «подложка – покрытие» позволяет научно подойти к разработке архитектуры покрытий (выбору химического и фазового состава слоев, их количества, толщин и способов формирования), а также существенно сократить объем экспериментальных исследований и испытаний, время и затраты на их реализацию. Для расчетной оценки теплового и напряженно-деформированного состояния функциональных покрытий различного назначения должна быть создана база данных по физико-механическим и теплофизическим свойствам перспективных материалов слоев.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аппен А.А. *Температурустойчивые неорганические покрытия*. – Л.: Изд-во «Химия», 1976. – 296 с.
2. Хокинг М., Васантасри В., Сидки П. *Металлические и керамические покрытия: получение, свойства и применение*. – М.: Мир, 2000. – 516 с.
3. Бобров Г.В., Ильин А.А., Спектор В.С. *Теория и технология формирования неорганических покрытий*. – М.: Альфа, 2014. – 928 с.
4. Астапов А.Н., Терентьева В.С. *Обзор отечественных разработок в области защиты углеродсодержащих материалов от газовой коррозии и эрозии в скоростных потоках плазмы // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. – 2014. – №4. – С.50-70.
5. Терентьева В.С., Астапов А.Н., Еремина А.И. *Анализ перспективных антиокислительных покрытий на жаропрочные углеродсодержащие композиционные материалы (обзор) // Коррозия: материалы, защита*. – 2014. – №1. – С.30-42.
6. Терентьева В.С., Астапов А.Н. *Концептуальная модель защиты особо жаропрочных материалов в гиперзвуковых потоках окислительного газа // Известия вузов. Порошковая металлургия и функциональные покрытия*. – 2017. – №3. – С.51-64.
7. Астапов А.Н., Нуштаев Д.В. *Методика расчета НДС системы «жаропрочный материал – защитное покрытие» / XXII Межд. симпоз. «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Материалы Т.1*. – М.: ООО «ТР-принт», 2016. – С.24-26.
8. Астапов А.Н., Жаворонок С.И. *Расчет НДС в многослойной системе «подложка – функциональное покрытие» при тепловом нагружении // 2-я Межд. конф. «Деформирование и разрушение композиционных материалов и конструкций» (DFCMS-2016). Труды*. – М.: «Столица», 2016. – С.8-10.
9. Нуштаев Д.В., Астапов А.Н. *Расчет напряженно-деформированного состояния в системе «подложка-покрытие» при тепловом нагружении // Механика композиционных материалов и конструкций*. – 2017. – Т.23. – №1. – С.134-151.
10. Сидоров А.Б., Кулямина Л.Л., Жорник А.И. *Распределение напряжений во внутреннем стеклянном покрытии стальных труб из-за различия коэффициентов расширения стекла и металла // Стекло*. – 1966. – №2. – С.51-59.
11. Ahrens M., Vaßen R., Stöver D. *Stress distributions in plasma-sprayed thermal barrier coatings as a function of interface roughness and oxide scale thickness // Surface and Coatings Technology*. – 2002. – Vol.161(1). – Pp.26-35.
12. Sfar K., Aktaa J., Munz D. *Numerical investigation of residual stress fields and crack behavior in TBC systems // Materials Science and Engineering: A*. – 2002. – Vol.333(1-2). – Pp.351-360.
13. Bäker M., Rösler J., Heinze G. *A parametric study of the stress state of thermal barrier coatings. Part II: Cooling stresses // Acta Materialia*. – 2005. – Vol.53(2). – Pp.469-476.
14. Białas M. *Finite element analysis of stress distribution in thermal barrier coatings // Surface & Coatings Technology*. – 2008. – Vol.202. – Pp.6002-6010.
15. Hermosilla U., Karunaratne M.S.A., Jones I.A., Hyde T.H., Thomson R.C. *Modelling the high temperature behaviour of TBCs using sequentially coupled*

- microstructural-mechanical FE analyses // Materials Science and Engineering: A.* – 2009. – Vol.513-514. – Pp.302-310.
16. Ni L.Y., Liu C., Huang H., Zhou C.G. *Thermal cycling behavior of thermal barrier coatings with HVOF NiCrAlY bond coat // J. of Thermal Spray Technology.* – 2011. – Vol.20(5). – Pp.1133-1138.
 17. Kahraman Y., İriç S., Taymaz İ. *Modeling of residual stresses in TBC coated gas turbine blades // TOJSAT – The Online Journal of Science and Technology.* – 2012. – Vol.2. – No.2. – Pp.51-56.
 18. Yang L., Liu Q.X., Zhou Y.C., Mao W.G., Lu C. *Finite element simulation on thermal fatigue of a turbine blade with thermal barrier coatings // J. of Materials Science & Technology.* – 2014. – Vol.30(4). – Pp.371-380.
 19. Liu D., Kyaw S.T., Flewitt P.E.J., Seraffon M., Simms N.J., Pavier M., Jones I.A. *Residual stresses in environmental and thermal barrier coatings on curved superalloy substrates: Experimental measurements and modelling // Materials Science and Engineering: A.* – 2014. – Vol.606. – Pp.117-126.
 20. Han M., Huang J., Chen S. *Behavior and mechanism of the stress buffer effect of the inside ceramic layer to the top ceramic layer in a double-ceramic-layer thermal barrier coating // Ceramics International.* – 2014. – Vol.40(2). – Pp.2901-2914.
 21. Зимон А.Д. *Адгезия пленок и покрытий.* – М.: Химия, 1977. – 352 с.
 22. Лунев В.М., Немашкало О.В. *Адгезионные характеристики покрытий и методы их измерения // Журнал физики и инженерии поверхности.* – 2010. – Т.8. – №1. – С.64-71.
 23. Zhu S., Wlosinski W. *Joining of AlN ceramic to metals using sputtered Al or Ti film // J. of Materials Processing Technology.* – 2001. – Vol.109. – No.3. – Pp.277-282.
 24. Pershin V., Lufitha M., Chandra S., Mostaghimi J. *Effect of substrate temperature on adhesion strength of plasma-sprayed nickel coatings // J. of Thermal Spray Technology.* – 2003. – Vol.12(3). – Pp.370-376.
 25. Liao Yi-de, Li Zhuang-yun, Tang Guo-qun *Evaluation for adhesion strength of coating and substrate by burying beforehand specimen // J. of Wuhan University of Technology – Mater. Sci. Ed.* – 2003. – Vol.18. – No.1. – Pp.31-36.
 26. Benjamin P., Weaver C. *Measurement of adhesion of thin films // Proceedings of the Royal Society A.* – 1960. – Vol.254. – No.1277. – Pp.163-176.
 27. Hamilton G.M., Goodman L.E. *The stress field created by a circular sliding contact // J. of Applied Mechanics.* – 1966. – Vol.33. – No.2. – Pp.371-376.
 28. Kinbara A., Baba S., Kusano E. *Adhesion measurement of thin films on glass substrates by scratch method / 2nd Intern. Conf. on Coatings on Glass (ICCG-2). Proceedings.* – September 6-10, 1998, Saarbrucken, Germany. – 1999. – Pp.218-222.
 29. Ichimura H., Ishii Y. *Effects of indenter radius on the critical load in scratch testing // Surface and Coatings Technology.* – 2003. – Vol.165. – No.1. – Pp.1-7.
 30. Gonczy S.T., Randall N. *An ASTM standard for quantitative scratch adhesion testing of thin, hard ceramic coatings // Intern. J. of Applied Ceramic Technology.* – 2005. – Vol.2. – No.5. – Pp.422-428.
 31. Sui J.H., Cai W. *Formation of ZrO₂ coating on the NiTi alloys for improving their surface properties // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms.* – 2006. – Vol.251. – No.2. – Pp.402-406.

32. Rybicki E.F., Kanninen M.F. *A finite element calculation of stress intensity factors by a modified crack closure integral* // Engineering Fracture Mechanics. – 1977. – Vol.9. – No.4. – Pp.931-938.
33. Belytschko T., Black T. *Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing* // Intern. J. for Numerical Methods in Engineering. – 1999. – Vol.45. – No.5. – Pp.601-620.
34. Diehl T. *Modeling surface-bonded structures with ABAQUS cohesive elements: beam-type solutions* / ABAQUS User's Conference 2005. Proceedings. – May 18-20, 2005, Stockholm, Sweden. – 2005. – Pp.89-115.
35. Nekkanty S., Walter M.E., Shivpuri R. *A cohesive zone finite element approach to model tensile cracks in thin film coatings* // J. of Mechanics of Materials and Structures. – 2007. – Vol.2. – No.7. – Pp.1231-1247.
36. Roth S., Kuna M. *Modelling of interfacial damage and delamination of sprayed coatings with cohesive elements* // Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics. – 2011. – Vol.11. – No.1. – Pp.175-176.
37. Курочкин А.В., Кожина Т.Д. *Оптимизация архитектуры многослойных износостойких наноструктурированных покрытий* // Вестник Рыбинской государственной авиационной технологической академии им. П.А. Соловьева. – 2012. – №2. – С.23-28.
38. Qin F., Shen N., Chou K. *Implementing a cohesive zone interface in a diamond-coated tool for 2D cutting simulations* / ASME 2012 Intern. Mechanical Engineering Congress and Exposition. Proceedings. – November 9-15, 2012, Houston, Texas, USA. – 2012. – Vol.3. – Pp.1091-1098.
39. Han B., Veidt M., Reiner J., Dargusch M. *Application of augmented finite element and cohesive zone modelling to predict damage evolution in metal matrix composites and aircraft coatings* // J. of Mechanical Engineering Research. – 2016. – Vol.8(1). – Pp.1-17.
40. Нуштаев Д.В., Астапов А.Н. *Расчет НДС системы «жаропрочный материал – покрытие» в случае подложки неканонической формы* / XXIII Межд. симпоз. «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред» им. А.Г. Горшкова. Материалы. Т.1. – М.: ООО «ТРП», 2017. – С.132-134.
41. Будиновский С.А., Каблов Е.Н., Мубояджян С.А. *Применение аналитической модели определения упругих напряжений в многослойной системе при решении задач по созданию высокотемпературных жаростойких покрытий для рабочих лопаток авиационных турбин* // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Серия: Машиностроение. – 2011. – №SP2. – С.26-37.
42. Астапов А.Н., Лифанов И.П. *Термодинамический расчет характеристик механических и теплофизических свойств стали аустенитного класса при высоких температурах* // Межд. научн. семинар «Динамическое деформирование и контактное взаимодействие тонкостенных конструкций при воздействии полей различной физической природы». Тезисы докладов. – М., 2014. – С.5-7.
43. Abaqus Theory Manual [Электронный ресурс]. – USA.: Dassault Systemes Simulia Corp., Providence, RI, 2016.

REFERENCES

1. Appen A.A. *Temperaturostoichivye neorganicheskie pokrytiia [Temperature stable inorganic coatings]*. Leningrad, Khimiia, 1976, 296 p.

2. Khoking M., Vasantasri V., Sidki P. *Metallicheskie i keramicheskie pokrytiia: poluchenie, svoistva i primenenie [Metal and ceramic coatings: production, properties and applications]*. Moskva, Mir, 2000, 516 p.
3. Bobrov G.V., Il'in A.A., Spektor V.S. *Teoriia i tekhnologiia formirovaniia neorganicheskikh pokrytii [Theory and technology of formation of inorganic coatings]*. Moskva, Al'fa, 2014, 928 p.
4. Astapov A.N., Terent'eva V.S. *Review of domestic designs in the field of protecting carbonaceous materials against gas corrosion and erosion in high-speed plasma fluxes*. Russian J. of Non-Ferrous Metals, 2016, Vol.57, No.2, Pp.157-173.
5. Terent'eva V.S., Astapov A.N., Eremina A.I. *Analiz perspektivnykh antiokislitel'nykh pokrytii na zharoprochnye uglerodsoderzhashchie kompozitsionnye materialy (obzor) [Analysis of perspective antioxidant coatings on heat-proof carbonic composite materials (a survey)]*. Korroziia: materialy, zashchita, 2014, No.1, Pp.30-42.
6. Terent'eva V.S., Astapov A.N. *Kontseptual'naia model' zashchity osobozharoprochnykh materialov v giperzvukovykh potokakh okislitel'nogo gaza [A concept model of the protection of strongly heat-resistant materials from oxidizing hypersonic jet flow]*. Izvestiia vuzov, Poroshkovaia metallurgii i funktsional'nye pokrytiia, 2017, No.3, Pp.51-64.
7. Astapov A.N., Nushtaev D.V. *Metodika rascheta NDS sistemy «zharoprochnyi material – zashchitnoe pokrytie» [Methods of computing of the stress and strain state of systems «heat-proof material – protective coating»]*. XXII Mezhd. Simpoz. «Dinamicheskie i tekhnologicheskie problemy mekhaniki konstruksij i sploshnykh sred», Materialy, Moskva, OOO «TR-print», 2016, Vol.1, Pp.24-26.
8. Astapov A.N., Zhavoronok S.I. *Raschet NDS v mnogosloinoi sisteme «podlozhka – funktsional'noe pokrytie» pri teplovom nagruzhении [Computation of the stress state in the multilayer substrate – functional coating system under thermal loading]*. 2 Mezhd. Konf. «Deformirovanie i razrushenie kompozitsionnykh materialov i konstruksii» (DFCMS-2016), Trudy, Moskva, Stolitsa, 2016, Pp.8-10.
9. Nushtaev D.V., Astapov A.N. *Raschet napriazhenno-deformirovannogo sostoianiia v sisteme «podlozhka-pokrytie» pri teplovom nagruzhении [Computing of stress and strain state in the coating-substrate system under heat loading]*. Mekhanika kompozitsionnykh materialov i konstruksii, 2017, Vol. 23, No.1, Pp.134-151.
10. Sidorov A.B., Kuliamina L.L., Zhornik A.I. *Raspredelenie napriazhenii vo vnutrennem stekliannom pokrytii stal'nykh trub iz-za razlichiiia koeffitsientov rasshireniia stekla i metalla [Stress distribution in the inner glass coatings of steel pipes due to the difference in the expansion coefficients of glass and metal]*. Steklo, 1966, No.2, Pp.51-59.
11. Ahrens M., Vaßen R., Stöver D. *Stress distributions in plasma-sprayed thermal barrier coatings as a function of interface roughness and oxide scale thickness*. Surface and Coatings Technology, 2002, Vol.161(1), Pp.26-35.
12. Sfar K., Aktaa J., Munz D. *Numerical investigation of residual stress fields and crack behavior in TBC systems*. Materials Science and Engineering: A, 2002, Vol.333(1-2), Pp.351-360.
13. Bäker M., Rösler J., Heinze G. *A parametric study of the stress state of thermal barrier coatings. Part II: Cooling stresses*. Acta Materialia, 2005, Vol.53(2), Pp.469-476.
14. Białas M. *Finite element analysis of stress distribution in thermal barrier coatings*. Surface & Coatings Technology, 2008, Vol.202, Pp.6002-6010.

15. Hermosilla U., Karunaratne M.S.A., Jones I.A., Hyde T.H., Thomson R.C. *Modelling the high temperature behaviour of TBCs using sequentially coupled microstructural-mechanical FE analyses*. Materials Science and Engineering: A, 2009, Vol.513-514, Pp.302-310.
16. Ni L.Y., Liu C., Huang H., Zhou C.G. *Thermal cycling behavior of thermal barrier coatings with HVOF NiCrAlY bond coat*. J of Thermal Spray Technology, 2011, Vol.20(5), Pp.1133-1138.
17. Kahraman Y., İriç S., Taymaz İ. *Modeling of residual stresses in TBC coated gas turbine blades*. TOJSAT – The Online Journal of Science and Technology, 2012, Vol.2, No.2, Pp.51-56.
18. Yang L., Liu Q.X., Zhou Y.C., Mao W.G., Lu C. *Finite element simulation on thermal fatigue of a turbine blade with thermal barrier coatings*. J. of Materials Science & Technology, 2014, Vol.30(4), Pp.371-380.
19. Liu D., Kyaw S.T., Flewitt P.E.J., Seraffon M., Simms N.J., Pavier M., Jones I.A. *Residual stresses in environmental and thermal barrier coatings on curved superalloy substrates: Experimental measurements and modeling*. Materials Science and Engineering: A, 2014, Vol.606, Pp.117-126.
20. Han M., Huang J., Chen S. *Behavior and mechanism of the stress buffer effect of the inside ceramic layer to the top ceramic layer in a double-ceramic-layer thermal barrier coating*. Ceramics International, 2014, Vol.40(2), Pp.2901-2914.
21. Zimon A.D. *Adgeziia plenok i pokrytii [Adhesion of films and coatings]*. Moskva, Khimiia, 1977, 352 p.
22. Lunev V.M., Nemashkalo O.V. *Adgezionnye kharakteristiki pokrytii i metody ikh izmereniia [Characteristics of adhesion of coatings and methods for measuring them]*. Zhurnal fiziki i inzhenerii poverkhnosti, 2010, Vol.8, No.1, Pp.64-71.
23. Zhu S., Wlosinski W. *Joining of AlN ceramic to metals using sputtered Al or Ti film*. J. of Materials Processing Technology, 2001, Vol.109, No.3, Pp.277-282.
24. Pershin V., Lufitha M., Chandra S., Mostaghimi J. *Effect of substrate temperature on adhesion strength of plasma-sprayed nickel coatings*. Journal of Thermal Spray Technology, 2003, Vol.12(3), Pp.370-376.
25. Liao Yi-de, Li Zhuang-yun, Tang Guo-qun. *Evaluation for adhesion strength of coating and substrate by burying beforehand specimen*. J. of Wuhan University of Technology, Mater. Sci. Ed., 2003, Vol.18, No.1, Pp.31-36.
26. Benjamin P., Weaver C. *Measurement of adhesion of thin films*. Proceedings of the Royal Society A, 1960, Vol.254, No.1277, Pp.163-176.
27. Hamilton G.M., Goodman L.E. *The stress field created by a circular sliding contact*. J. of Applied Mechanics, 1966, Vol.33, No.2, Pp.371-376.
28. Kinbara A., Baba S., Kusano E. *Adhesion measurement of thin films on glass substrates by scratch method*. 2nd Intern. Conf. on Coatings on Glass (ICCG-2), Proceedings, Saarbrücken, Germany, 1999, Pp.218-222.
29. Ichimura H., Ishii Y. *Effects of indenter radius on the critical load in scratch testing*. Surface and Coatings Technology, 2003, Vol.165, No.1, Pp.1-7.
30. Gonczy S.T., Randall N. *An ASTM standard for quantitative scratch adhesion testing of thin, hard ceramic coatings*. Intern. J. of Applied Ceramic Technology, 2005, Vol.2, No.5, Pp.422-428.
31. Sui J.H., Cai W. *Formation of ZrO₂ coating on the NiTi alloys for improving their surface properties*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2006, Vol.251, No.2, Pp.402-406.

32. Rybicki E.F., Kanninen M.F. *A finite element calculation of stress intensity factors by a modified crack closure integral*. Engineering Fracture Mechanics, 1977, Vol.9, No.4, Pp.931-938.
33. Belytschko T., Black T. *Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing*. Intern. J. for Numerical Methods in Engineering, 1999, Vol.45, No.5, Pp.601-620.
34. Diehl T. *Modeling surface-bonded structures with ABAQUS cohesive elements: beam-type solutions*. ABAQUS User's Conference 2005, Proceedings, Stockholm, Sweden, 2005, Pp.89-115.
35. Nekkanty S., Walter M.E., Shivpuri R. *A cohesive zone finite element approach to model tensile cracks in thin film coatings*. J. of Mechanics of Materials and Structures, 2007, Vol.2, No.7, Pp.1231-1247.
36. Roth S., Kuna M. *Modelling of interfacial damage and delamination of sprayed coatings with cohesive elements*. Proceedings in Applied Mathematics and Mechanics, 2011, Vol.11, No.1, Pp.175-176.
37. Kurochkin A.V., Kozhina T.D. *Optimizatsiia arkhitektury mnogoslainnykh iznosostoikikh nanostrukturirovannykh pokrytii [Architecture optimization for the multilayer wear-resistant nano-structured coatings]*. Vestnik Rybinskoi gosudarstvennoi aviatsionnoi tekhnologicheskoi akademii im. P.A. Solov'eva, 2012, No.2, Pp.23-28.
38. Qin F., Shen N., Chou K. *Implementing a cohesive zone interface in a diamond-coated tool for 2D cutting simulations*. ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings, Houston, Texas, USA, 2012, Vol.3, Pp.1091-1098.
39. Han B., Veidt M., Reiner J., Dargusch M. *Application of augmented finite element and cohesive zone modelling to predict damage evolution in metal matrix composites and aircraft coatings*. J. of Mechanical Engineering Research, 2016, Vol.8(1), Pp.1-17.
40. Nushtaev D.V., Astapov A.N. *Raschet NDS sistemy «zharoprochnyi material – pokrytie» v sluchae podlozhki nekanonicheskoi formy [Calculation of the strain-stress state of the «heat-resistant material-coating» system in the case of a non-canonical substrate]*. XXIII Mezhd. Simpoz. «Dinamicheskie i tekhnologicheskie problemy mekhaniki konstruksii i sploshnykh sred», Materialy, Moskva, OOO «TRP», 2017, Vol. 1, Pp. 132-134.
41. Budinovskii S.A., Kablov E.N., Muboiadzhian S.A. *Primenenie analiticheskoi modeli opredeleniia uprugikh napriazhenii v mnogoslainnoi sisteme pri reshenii zadach po sozdaniuu vysokotemperaturnykh zharostoikikh pokrytii dlia rabochikh lopatok aviatsionnykh turbin [Application of the analytical method of estimation of stresses in multilayer systems to design the high-temperature heat-proof coatings for aviation turbine blades]*. Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Seriya Mashinostroenie, 2011, No.SP2, Pp.26-37.
42. Astapov A.N., Lifanov I.P. *Termodinamicheskii raschet kharakteristik mekhanicheskikh i teplofizicheskikh svoistv stali austenitnogo klassa pri vysokikh temperaturakh [Thermodynamic computation of mechanical and thermal properties of austenitic steels at high temperature levels]*. Mezhd. nauchn. seminar «Dinamicheskoe deformirovanie i kontaktnoe vzaimodeistvie tonkostennykh konstruksii pri vozdeistvii polei razlichnoi fizicheskoi prirody», Tezisy dokladov, Moskva, 2014, Pp.5-7.

43. *Abaqus Theory Manual [Elektronnyi resurs]*. USA, Dassault Systemes Simulia Corp., Providence, RI, 2016.

Поступила в редакцию 16 января 2018 года

Сведения об авторах:

Нуштаев Дмитрий Владимирович – к.т.н., инж., Отдел проектирования и инженерного анализа, Общество с ограниченной ответственностью «Тесис», г. Москва, Россия; e-mail: nyshtaev.vfb@rambler.ru

Астапов Алексей Николаевич – к.т.н., доц., Кафедра «Материаловедение», ФГБОУ высшего образования «Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет)», г. Москва, Россия; e-mail: lexxa1985@inbox.ru