

РАСЧЕТ НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ В СИСТЕМЕ «ПОДЛОЖКА – ПОКРЫТИЕ» ПРИ ТЕПЛОВИМ НАГРУЖЕНИИ¹

Нуштаев Д.В.¹, Астапов А.Н.²

¹Общество с ограниченной ответственностью «Тесис», г. Москва, Россия

²ФГБОУ высшего образования «Московский авиационный институт
(национальный исследовательский университет)», г. Москва, Россия

АННОТАЦИЯ

Аналитически исследовано напряженно-деформированное состояние (НДС) свободной от внешних усилий и закреплений конструкционной стенки «подложка – покрытие» при плавном тепловом нагружении. Рассмотрена односвязная задача термоупругости в постановке для плоского напряженного состояния. Оценка НДС осуществлена в безмоментном приближении (без учета изгиба) в предположении постоянства температуры по толщине стенки. Построены температурные зависимости тепловых напряжений в слоях стенки. Выявлено, что текущий уровень напряжений в слоях зависит, прежде всего, от разницы коэффициентов температурного линейного расширения материалов подложки и покрытия, а также от значений их модулей упругости, коэффициентов Пуассона и толщин.

Построенное численное решение на базе метода конечных элементов (МКЭ) краевой задачи классической термоупругости, соответствующей модели, положенной в основу аналитического решения, привело к идентичным результатам. Выявлены недостатки и ограничения, вносимые в решение рассматриваемыми допущениями.

Предложено уточненное решение задачи определения НДС в системе «подложка – покрытие» при тепловом нагружении на базе МКЭ, учитывающее изгибные деформации. Решение получено для полубесконечной пластины в постановке для обобщенной плоской деформации. Учет изгиба привел к существенному изменению уровня и характера распределения тепловых напряжений по толщине стенки. Показано, что расчет НДС без явного учета геометрической формы подложки даже в простейшем случае полубесконечной пластины приводит к недопустимым погрешностям. Выработаны основные требования к конечно-элементным моделям, применяемым к исследованию НДС в системе «подложка – покрытие».

Оценка уровня и характера распределения напряжений позволяет научно подойти к разработке архитектуры покрытий (выбору химического и фазового состава слоев, их количества и толщин), а также существенно сократить количество экспериментальных исследований и испытаний, время и затраты на их реализацию.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние; тепловые напряжения; остаточные напряжения; многослойная система; подложка; функциональное покрытие; метод конечных элементов

¹ Работа выполнена в рамках государственной поддержки молодых российских ученых (грант Президента РФ МК-7921.2016.8) и при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 14-01-00890-а, № 17-08-01527-а).

COMPUTING OF STRESS AND STRAIN STATE IN THE COATING-SUBSTRATE SYSTEM UNDER HEAT LOADING

Nushtaev D.V.¹, Astapov A.N.²

¹*LTD «Tesis», Moscow, Russia*

²*Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow, Russia*

ABSTRACT

The simple coupled plane thermoelasticity problem for a smoothly loaded unconstrained coating – substrate system is considered and its plane stress state is studied analytically. To simplify the problem statement, temperature fields are supposed to be constant in the thickness direction, and bending strains are neglected. The dependency of stresses in layers on the temperature is analyzed; it is shown that the stresses are depending on the differences between the elasticity moduli, the Poisson's ratios, and the linear expansion factors of the coating and substrate, as well as on their thicknesses.

The finite element solution of the classical thermoelasticity boundary value problem corresponding to the simplified model has been constructed. The obtained numerical results are quite identical to the analytical ones. The drawbacks and restrictions due to the introduced assumptions are discussed.

To refine such a solution, the bending strain state of the thermally loaded coating – substrate system is taken into account in the improved finite element model. The plane strain of a semi-infinite plate is investigated and the significant effect of the bending on the distribution of heat-induced stresses as well as on their amplitudes is found. It is shown that the analysis of the stress state leads to inadmissible errors if the substrate geometry effect is neglected even for the simplest particular case of semi-infinite substrate.

The obtained results show that the finite element simulation has to be used as a main tool for the certain estimation of the stress state on the coating – substrate system. This estimation and the analysis of the level and distribution of the stresses through the thickness of the structure allows one to develop the coatings architecture, i. e. their chemical and phase constitution, layers number and thickness etc. as well as to reduce number, total time and costs of physical tests.

Keywords: stress and strain state; heat induced stresses; residual stresses; multilayer systems; substrates; functional coatings; finite element simulation

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время во многих отраслях промышленности (авиационной, космической, ракетной, машиностроительной и др.) особое внимание уделяется вопросам увеличения тактико-технических характеристик создаваемых изделий, повышения их надежности, ресурса и экономичности. Решение проблем требует применения материалов, способных работать в различных агрессивных средах, в условиях циклических и знакопеременных нагрузок, высоких температур, давлений, вибраций, в том числе, при взаимодействии со скоростными высокоэнтальпийными потоками газов (воздуха, продуктов сгорания топлив) и т.д.

Многие рабочие параметры и эксплуатационные характеристики изделий в основном определяются физико-химическим состоянием поверхностного слоя материалов, из которых они изготовлены. Использование однородных по структуре материалов в большинстве случаев является недопустимым из-за невозможности одновременного удовлетворения ими многочисленных,

зачастую противоречивых, требований. Поэтому целесообразно применение либо функционально-градиентных материалов с плавным изменением химического состава и структуры по толщине, либо материалов со специальными многослойными защитными покрытиями конечных толщин, химический состав и структурно-фазовое состояние которых качественно отличаются от аналогичных характеристик материала основы. Использование покрытий технически и экономически предпочтительнее в силу широты спектра решаемых с их помощью задач.

Номенклатурный перечень разработанных к настоящему времени специальных защитных покрытий и методов их нанесения довольно широк. Покрытия имеют самые разнообразные свойства – износостойкость, коррозионную стойкость, жаростойкость, термостойкость, заданные тепло-, электро- и оптические свойства и т.д. Тем не менее, мировые достижения в области создания функциональных покрытий отстают от возрастающих требований разработчиков перспективной техники, особенно в ракетно-космической отрасли [1,2]. Поэтому приоритетной является задача создания новых, более эффективных защитных покрытий, а также технологий их нанесения и ремонта (при необходимости).

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 постоянные (остаточные, наведенные) или временные (термические) внутренние напряжения. 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). При напряжениях сжатия, превышающих допустимый предел, слои покрытия отслаиваются друг от друга и от основы, а при напряжениях растяжения в них возникают трещины. Поэтому, за редкими исключениями, следует принимать меры, направленные на снижение термомеханических напряжений в многослойных композициях. Вместе с тем напряжения сжатия предпочтительнее напряжений растяжения с точки зрения сопротивления усталостным или термоусталостным разрушениям. Кроме того, подавляющее большинство материалов, используемых для получения неорганических² покрытий, демонстрируют в условиях сжатия более высокий уровень механических свойств, чем при растяжении.

Большое влияние остаточных напряжений на эксплуатационные свойства изделий с покрытиями свидетельствует о необходимости серьезного контроля этого параметра качества. Более того, его логично использовать при выборе направлений разработки новых покрытий, особенно на ранних стадиях принятия конструкторских решений, в том числе, при проектировании или совершенствовании структуры покрытий и прогнозировании ряда их эксплуатационных свойств. Это позволит, с одной стороны, научно подойти к разработке архитектуры покрытий (выбору химического и фазового состава слоев, их количества и толщин), а с другой – существенно сократить количество экспериментальных исследований и испытаний, а, следовательно, время и затраты на их реализацию.

² Неорганические – состоящие из неорганических соединений металлов, например, оксидов, нитридов, боридов, карбидов, силицидов и других керамических, бескислородных и керамоподобных химических соединений.

Анализ расчетно-теоретических методик исследования напряженно-деформированного состояния (НДС) многослойных систем с привлечением подходов классической теории упругости и механики сплошной среды позволяет выделить два основных направления, сложившихся в данной области к настоящему времени. Первая группа методик [3-13] основана на построении приближенных *аналитических* оценок НДС системы «подложка – покрытие» с учетом ряда упрощающих гипотез. Вторая группа методик [14-19] состоит в *численном* моделировании НДС системы на базе метода конечных элементов, позволяющего учесть реальный облик изделия с покрытием, его геометрические размеры, возможность адгезионного/когезионного разрушения отдельных частей композиции с перераспределением напряжений и пр.

Целью настоящей работы является выработка методик построения конечно-элементных моделей в качестве базового инструмента оценки НДС многослойных систем и решения задач разработки или совершенствования архитектуры функциональных защитных покрытий.

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 основного материала 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.

Для проведения сравнительных расчетов с привлечением аналитических и численных моделей в данном исследовании 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 следующая задача. Свободный от закреплений образец в виде тонкой двухслойной пластины подвергается плавному охлаждению с температуры 1200°C вплоть до 20°C. Несущий слой образца выполнен из поликристаллического жаропрочного никелевого сплава ЖС6У. На его лицевую поверхность нанесено серийное жаростойкое алюминидное покрытие из сплава СДП-2 системы Ni-20Cr-12Al-0,5Y. Данное покрытие широко используется для увеличения жаростойкости лопаток турбин современных авиационных газотурбинных двигателей, выполненных из жаропрочных никелевых сплавов, в частности серии ЖС. Сечение рассматриваемой

конструкционной стенки в плоскости Oxy показано на рис.1. Индексы, используемые в обозначениях характеристик свойств слоев: s – *substrate* (подложка), l – *layer* (слой покрытия). Толщины, температурные зависимости механических и теплофизических свойств материалов слоев в интервале $20\div 1200^\circ\text{C}$ представлены в таблице 1.

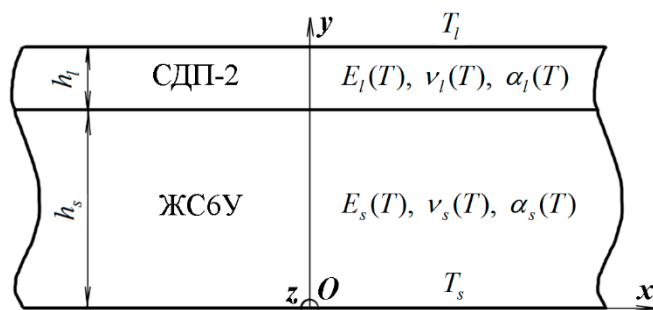


Рис.1. Модель двухслойной конструкционной стенки «ЖС6У – СДП-2».

Таблица 1.

Толщины, температурные зависимости свойств материалов слоев конструкционной стенки и коэффициенты детерминации моделей.

Слои Свойства	Подложка ЖС6У	Покрытие СДП-2	R^2 , подложка / покрытие
Толщина слоя h , мкм	1000	100	-
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 [9]. 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 [20], 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 таблице 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. Моделирование охлаждения будем осуществлять путем определения и приложения температурных граничных условий к свободным поверхностям покрытия T_l и подложки T_s (рис.1). При этом по мере охлаждения, в результате взаимного стеснения температурных деформаций слоев, возникающих вследствие различия в КТЛР подложки и покрытия, в системе появляются тепловые напряжения.

Анализ уровня и характера изменения напряжений в зависимости от температуры будем выполнять на базе решения односвязной задачи термоупругости, предполагающей последовательное решение задач теплопроводности и, собственно, термоупругости. Считаем, что температурное поле изменяется только по толщине конструкционной стенки $T(y)$ и находится из решения задачи теплопроводности в одномерной стационарной постановке с учетом контактных условий на границе слоев (равенство температур и тепловых потоков). Использование стационарной постановки оправданно в силу небольших толщин стенки и отсутствия скачкообразного изменения температуры. Необходимость решения задачи теплопроводности в нестационарной постановке возникает в случае, когда конструкционная стенка имеет значительную толщину, либо когда материалы слоев существенно отличаются по своим теплофизическим свойствам (например, при расчете термобарьерных покрытий с низкой теплопроводностью).

2. АНАЛИТИЧЕСКОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

К настоящему времени опубликован ряд фундаментальных работ [3-7 и др.], посвященных разработке методов определения остаточных напряжений и изучению их природы формирования в конструкционных материалах под воздействием различных видов обработки. Однако из-за многообразия причин, влияющих на возникновение остаточных напряжений, и сложности их математического описания число публикаций не уменьшается. Кроме того, многие аспекты прогнозирования и регулирования значений и знака напряжений остаются открытыми, особенно в области получения многослойных гетерофазных покрытий и их последующей эксплуатации.

Для проведения аналитических расчетов рассмотрим ряд упрощающих гипотез и допущений. Пластина свободна от внешних усилий и закреплений. Геометрические размеры пластины будем считать такими, что вдали от краев реализуется плоское напряженное состояние и применимы гипотезы Кирхгофа [21]. В случае одномерного распределения температуры по толщине стенки можно считать, что в ней не возникает деформаций сдвига ε_{xz} и касательных напряжений τ_{xz} . Строго говоря, в результате взаимного стеснения температурных деформаций слоев, вызванных несоответствием в КТЛР, как в подложке, так и в покрытии, будут возникать локализованные в окрестности поверхности раздела касательные напряжения τ_{xz} и соответствующие им сдвиговые деформации ε_{xz} . В первом приближении пренебрежем ими вследствие тонкости слоя покрытия и относительно высокой жесткости подложки. Таким образом,

отличными от нуля будут только компоненты тензора напряжений σ_x и σ_z .
Материалы слоев – изотропны и подчиняются закону Гука-Дюамеля.

В подавляющем большинстве опубликованных работ [5,8,9,11,13 и др.], за некоторым исключением [4,7,10,12], построение приближенных аналитических оценок НДС многослойных систем с учетом приведенных выше допущений осуществлено в безмоментном приближении, т.е. без учета изгибной составляющей. В этих условиях тангенциальные тепловые напряжения, возникающие в слоях конструкционной стенки со свободными поверхностями, выражаются общим соотношением [6]

$$\sigma_x = \sigma_z = \sigma = \frac{E}{1-\nu} \cdot \left(-\alpha \cdot \Delta T(y) + \frac{N_0}{A} \right),$$

$$N_0 = \int_0^h \frac{E}{1-\nu} \cdot \alpha \cdot \Delta T(y) dy, \quad A = \int_0^h \frac{E}{1-\nu} dy.$$

Первое слагаемое в скобках отвечает чисто тепловым деформациям, возникающим при изменении температуры на $\Delta T(y)$, второе слагаемое соответствует деформациям теплового растяжения-сжатия срединной поверхности. Здесь E , ν , α – модуль упругости, коэффициент Пуассона, коэффициент температурного линейного расширения материалов слоев конструкционной стенки, которые в общем случае являются функциями от переменной y и текущего значения температуры $T(y)$; h – толщина стенки; $\Delta T(y) = T(y) - T_0$ – разность между текущим значением температуры $T(y)$ и температурой ненапряженного состояния T_0 .

Тогда применительно к конструкционной стенке, состоящей из двух слоев, в предположении постоянства температуры по толщине стенки $T(y) = T = const$, формулы для расчета тангенциальных тепловых напряжений в покрытии σ_{lx} , σ_{lz} и подложке σ_{sx} , σ_{sz} будут иметь вид (1)

$$\sigma_{lx} = \sigma_{lz} = \sigma_l = \frac{(\alpha_s - \alpha_l) \cdot \Delta T}{\frac{1-\nu_l}{E_l} + \frac{1-\nu_s}{E_s} \cdot \frac{h_l}{h_s}}, \quad \sigma_{sx} = \sigma_{sz} = \sigma_s = -\sigma_{lx} \cdot \frac{h_l}{h_s}. \quad (1)$$

здесь E_l , ν_l , α_l , h_l – модуль упругости, коэффициент Пуассона, КТЛР, толщина покрытия, соответственно; E_s , ν_s , α_s , h_s – то же для подложки, соответственно.

Из (1) следует, что для снижения тепловых напряжений необходимо выбирать материал покрытия с коэффициентом температурного линейного расширения, максимально близким к КТЛР основного материала. При полном согласовании этих характеристик напряжений в покрытии и подложке не возникает в силу отсутствия стеснений при совместной деформации слоев. Однако обеспечить на практике согласованность указанных свойств в широком интервале температур – задача практически не выполнимая, поскольку слои конструкционной стенки представляют собой качественно разные (по химическому составу и структурно-фазовому состоянию) материалы. Поэтому задача преимущественно сводится к анализу эволюции термических напряжений в зависимости от архитектуры стенки и выбору ее рациональных параметров (химического и фазового состава слоев, их количества и толщин) с позиции минимизации возникающих напряжений.

Температурные зависимости КТЛР для выбранных в настоящей работе материалов слоев конструкционной стенки проиллюстрированы на рис.2. На кривых имеет смысл выделить три участка: $\alpha_s > \alpha_l$ при $T < 137,6^\circ\text{C}$; $\alpha_s = \alpha_l$ при $T = 137,6^\circ\text{C}$; $\alpha_s < \alpha_l$ при $T > 137,6^\circ\text{C}$.

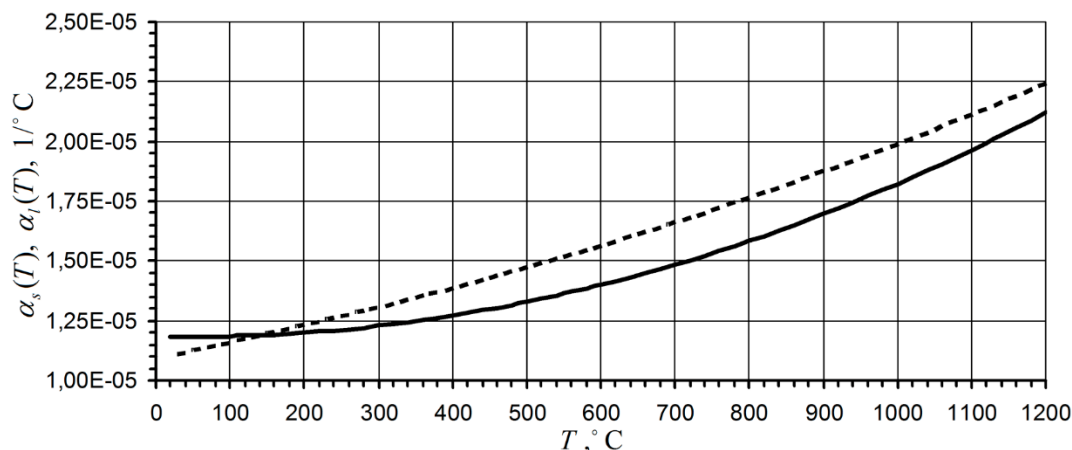


Рис.2. Температурная зависимость КТЛР материалов слоев стенки [9]:
 - - - покрытие; — — подложка.

Характер температурной зависимости тангенциальных напряжений в слоях рассматриваемой стенки, рассчитанных по формулам (1), представлены на рис.3.

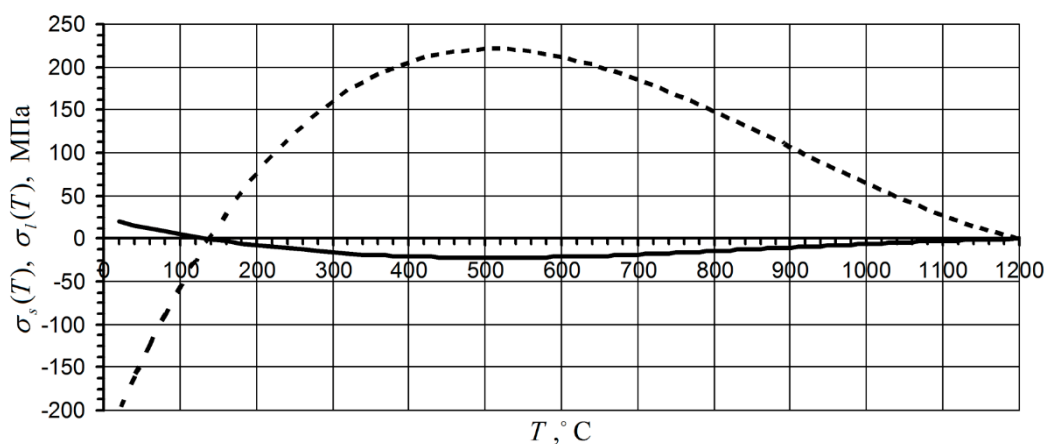


Рис.3. Температурные зависимости тепловых напряжений в слоях стенки (без учета изгиба): - - - покрытие; — — подложка.

Стремясь сузиться при охлаждении, покрытие сдерживает подложка, 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 $T = 507,2^\circ\text{C}$, которые составляют для покрытия $\sigma_l = 221,697$ МПа; для подложки — $\sigma_s = -22,169$ МПа. Дальнейшее охлаждение приводит к снижению σ_l и σ_s . При $T = 137,6^\circ\text{C}$ система свободна от тепловых напряжений $\sigma_l = \sigma_s = 0$. После $T < 137,6^\circ\text{C}$ в покрытии наблюдается рост сжимающих, а в подложке — растягивающих напряжений, которые при $T = 20^\circ\text{C}$ достигают следующих

значений $\sigma_l = -198,796$ МПа; $\sigma_s = 19,879$ МПа, соответственно. Подобное поведение объясняется сложными зависимостями механических характеристик и КТЛР материалов слоев от температуры (см. табл.1).

3. ЧИСЛЕННОЕ РЕШЕНИЕ ЗАДАЧИ

Представленная выше аналитическая модель позволяет в первом приближении оценить уровень тепловых напряжений в слоях конструкционной стенки. Однако она не учитывает особенностей ее деформирования, связанных с тепловым изгибом, реальным обликом изделия, его геометрическими размерами, условиями закрепления в конструкции, возможностью адгезионного/когезионного разрушения отдельных частей композиции с перераспределением напряжений и пр. Данные задачи могут быть решены с использованием современных инструментов численного моделирования. К наиболее распространенным методам численного решения задач математической физики стоит отнести метод конечных элементов (МКЭ), являющийся основой ряда инженерных программных комплексов.

3.1. Численное решение задачи без учета изгибного деформирования.

На первом этапе строится численное решение одномерной задачи теории термоупругости в постановке, соответствующей приведенному выше аналитическому решению.

Конечно-элементная модель задачи, созданная в программном комплексе SIMULIA Abaqus, состоит из двух объемных 8-ми узловых призматических конечных элементов (КЭ) C3D8R [22] с одной точкой интегрирования по центру (рис.4). Двумерные КЭ, часто применяемые при решении подобного рода задач [14-19], не позволяют учесть ряд особенностей аналитического решения. Например, решение на базе элементов, реализующих плоское деформированное состояние (CPE4R), не удовлетворяет условию $\sigma_x = \sigma_z$, а для элементов обобщенной плоской деформации (CPEG4R) не удается исключить изгибную составляющую в плоскости Oyz . Предполагаемый характер НДС ($\sigma_x(y) = \sigma_z(y) = const$; $\sigma_y = 0$) допускает использование по одному КЭ для покрытия и подложки без применения техник локального уплотнения расчетной модели.

Граничные условия модели (перемещения узлов)

$$U_x^i = 0, \quad i = 1, 2, 5, 6, 9, 10;$$

$$U_y^i = 0, \quad i = 1 \dots 4;$$

$$U_z^i = 0, \quad i = 2, 3, 6, 7, 10, 11.$$

Для исключения изгиба в плоскостях Oux и Ouz к перемещениям ряда узлов применены следующие кинематические связи

$$U_x^i - U_x^3 = 0, \quad i = 4, 7, 8, 11, 12;$$

$$U_z^i - U_z^1 = 0, \quad i = 4, 5, 8, 9, 12.$$



Рис.4. Конечно-элементная модель ($i = 1, 2 \dots 12$ – нумерация узлов).

Механический отклик материалов слоев конструкционной стенки описывался линейным законом Гука – Дюамеля. Зависимости $E(T)$, $\nu(T)$, $\alpha(T)$ (табл.1) приводят к изменению жесткости материала в течение расчета, т.е. к физической нелинейности. В качестве метода решения нелинейной задачи был выбран инкрементально-итерационный метод Ньютона-Рафсона [22], являющийся основой решателя Abaqus/Standard. Принят фиксированный размер приращения по температуре $\Delta T = 20^\circ\text{C}$.

На основе построенной модели были получены значения тепловых напряжений в покрытии и подложке конструкционной стенки при ее охлаждении. Результаты численного решения хорошо согласуются с данными аналитического расчета (табл.2).

Таблица 2.

Результаты сравнительных расчетов тепловых напряжений.

Расчетная модель	σ_l , МПа			σ_s , МПа		
	900°C	500°C	20°C	900°C	500°C	20°C
Аналитическое решение (без учета изгиба)	107,076	221,635	-198,796	-10,707	-22,163	19,879
Численное решение без учета изгиба	107,037	221,632	-198,792	-10,704	-22,163	19,879
Численное решение с учетом изгиба	82,888	179,257	-167,003	-34,301	-74,586	69,791

Максимальная относительная погрешность результатов численных вычислений не превышает 0,04% во всем интервале температур. Таким образом, обоснована правомерность использования МКЭ для получения корректных оценок НДС в системе «подложка – покрытие».

3.2. Численное решение задачи с учетом изгиба.

Предложенные ранее аналитическое и полностью ему соответствующее численное решение не учитывают изгибную составляющую напряжений, обусловленную изменением кривизны стенки вследствие ее неоднородности и несимметричности относительно срединной поверхности. Известно [5], что напряжения, как правило, достигают своих максимальных значений на границах раздела слоев и убывают по мере удаления от них, тогда как напряжения, полученные в п. 3 и п. 4.1, постоянны по толщине в пределах каждого слоя. Помимо этого, благодаря градиенту напряжений по толщине в слоях покрытий, находящихся в сжатом состоянии, появляются дополнительные нормальные напряжения $\sigma_y \neq 0$, стремящиеся либо оторвать слои покрытия от основы (при возникновении положительной кривизны стенки), либо, наоборот, прижать их (при отрицательной кривизне). Таким образом, полученные ранее решения неполно отражают реальный характер НДС и требуют уточнения.

Рассматривается процесс охлаждения полубесконечной пластины с нанесенным покрытием [14] (линейные размеры по осям: $L_x = L$; $L_y = h_s + h_f$; $L_z \rightarrow \infty$). Принятая в расчетах длина пластины вдоль оси Ox ($L = 20 \cdot h_s$) обеспечивает плоское НДС в центральной ее части, сводя к минимуму влияние краевых эффектов. Ввиду симметричности задачи относительно оси Ox , расчет проводился для половины пластины с заданием кинематических условий симметрии на границе выреза: $U_x = UR_z = 0$ (рис.5). Конечно-элементная модель создана на базе двумерных четырехузловых КЭ (СРЕG4R), работающих в режиме обобщенной плоской деформации ($\varepsilon_z = const$). По толщине покрытия использовано 5 КЭ, а для подложки – 20 с локальным уплотнением в направлении адгезионного слоя.

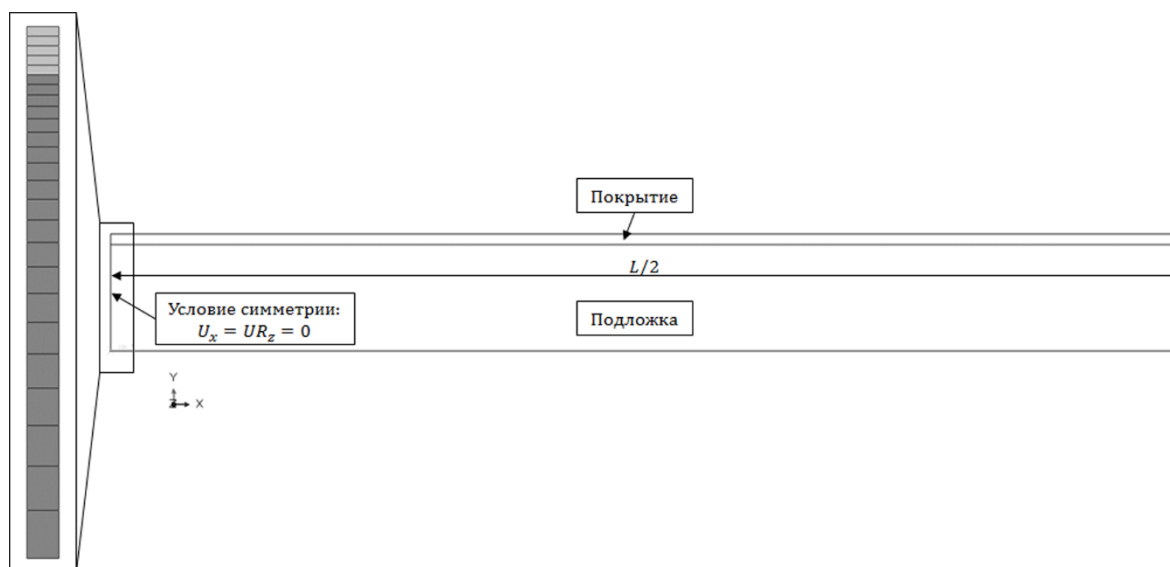


Рис.5. Постановка задачи с учетом изгиба.

Вследствие несимметричности конструкционной стенки относительно срединной плоскости и разных значений КТЛР материалов ее слоев, наблюдается изгиб пластины при охлаждении. Направление изгиба (тип кривизны) зависит от текущего значения разности КТЛР покрытия и подложки $\Delta\alpha = \alpha_l - \alpha_s$. При $\Delta\alpha > 0$ ($T > 137,6^\circ\text{C}$) изгиб приводит к отрицательной кривизне (вогнутости) срединной поверхности, а при $\Delta\alpha < 0$ ($T < 137,6^\circ\text{C}$) – к положительной кривизне (выпуклости). Для наглядного представления формы изгиба на рис.6 представлены наложенные друг на друга недеформированная и деформированная формы пластины при температурах $T=500^\circ\text{C}$ и $T=20^\circ\text{C}$ с применением коэффициента масштабирования 12.

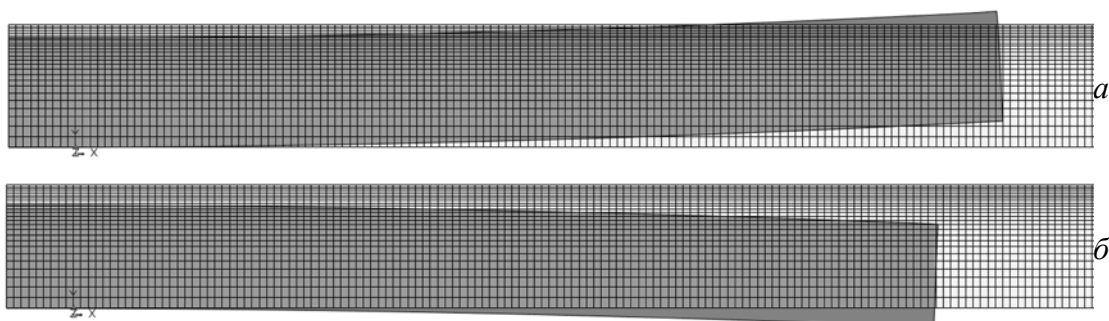


Рис.6. Недеформированная и деформированная форма пластины при температуре: *a* – $T=500^\circ\text{C}$; *б* – $T=20^\circ\text{C}$ (масштабный фактор 12).

Наличие изгиба приводит к неравномерному распределению напряжений по толщине конструкционной стенки. На рис.7 представлено распределение напряжений по толщине при $T=500^\circ\text{C}$.

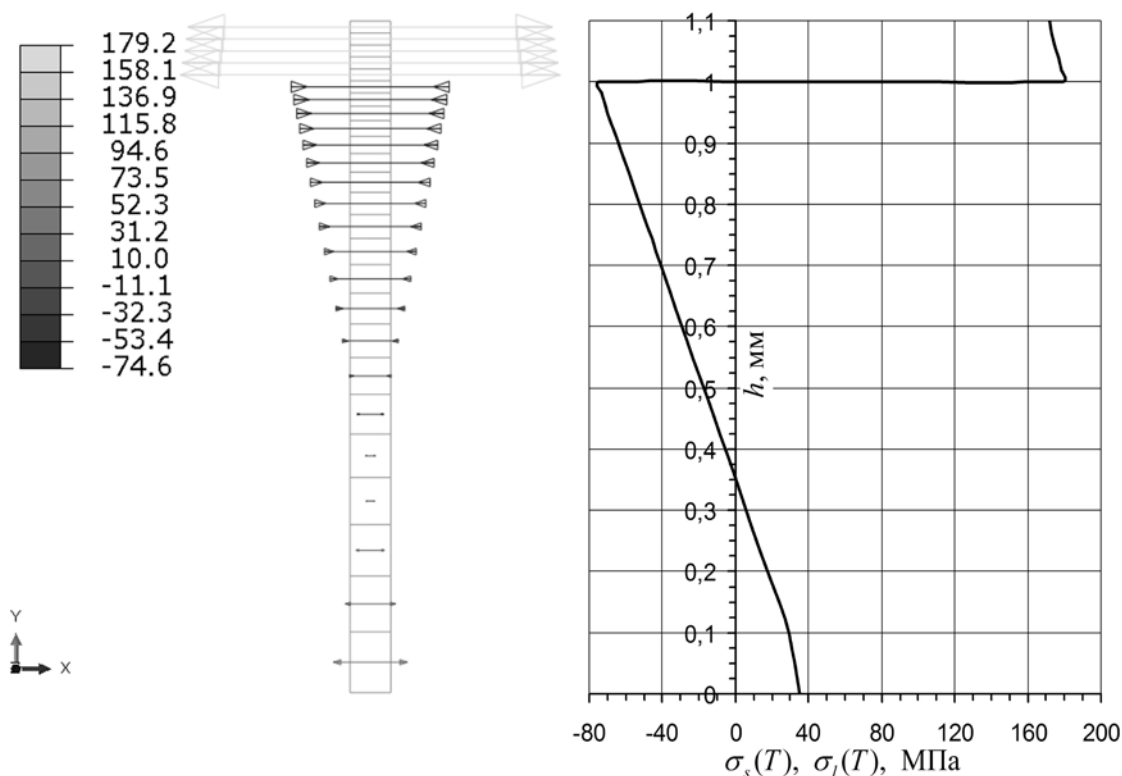


Рис.7. Распределение тепловых напряжений по толщине конструкционной стенки при $T=500^\circ\text{C}$, МПа.

Для анализа выбран ряд элементов, расположенных в центральной части пластины (рис.5). В толще покрытия действуют только растягивающие напряжения (σ_l^+). Причем своих максимальных значений $\sigma_l^+ = 179,257$ МПа они достигают на границе раздела с подложкой. По мере приближения к свободной поверхности покрытия наблюдается практически линейное их падение до $\sigma_l^+ = 172,109$ МПа. Подложка подвергнута как растягивающим напряжениям (σ_s^+) – в нижней части (с противоположной стороны от покрытия), так и сжимающим (σ_s^-) – в верхней части (прилегающей к покрытию), что достаточно характерно при изгибе. Точка перехода области σ_s^+ в σ_s^- (нейтральная зона) находится на уровне 0,35 мм от нижней поверхности подложки (рис.7).

Помимо уточнения характера распределения напряжений по толщине конструкционной стенки, переход к 2D постановке, учитывающей изгиб пластины, привел к изменению их уровня. На рис.8 и 9 представлены сравнительные графики зависимости напряжений от температуры, полученные на базе математических моделей без и с учетом изгиба.

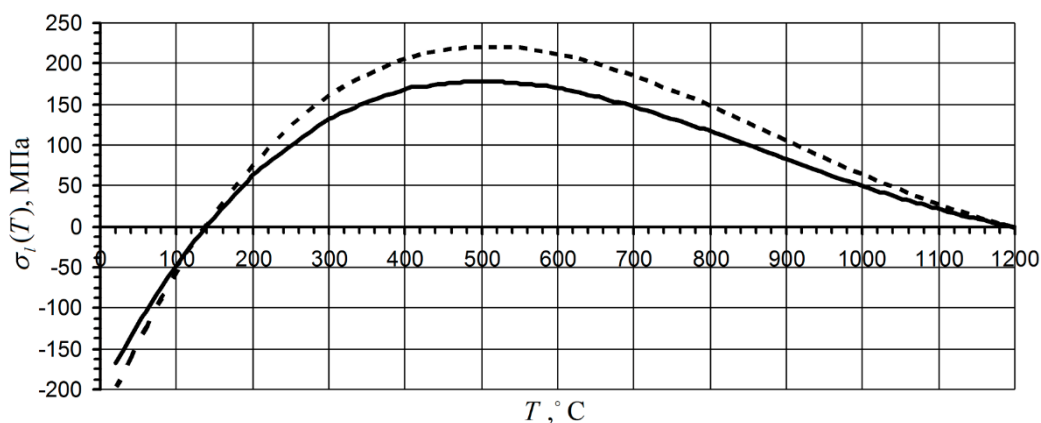


Рис.8. Температурные зависимости тепловых напряжений в покрытии на границе раздела «подложка – покрытие»: - - - без учета изгиба; — с учетом изгиба.

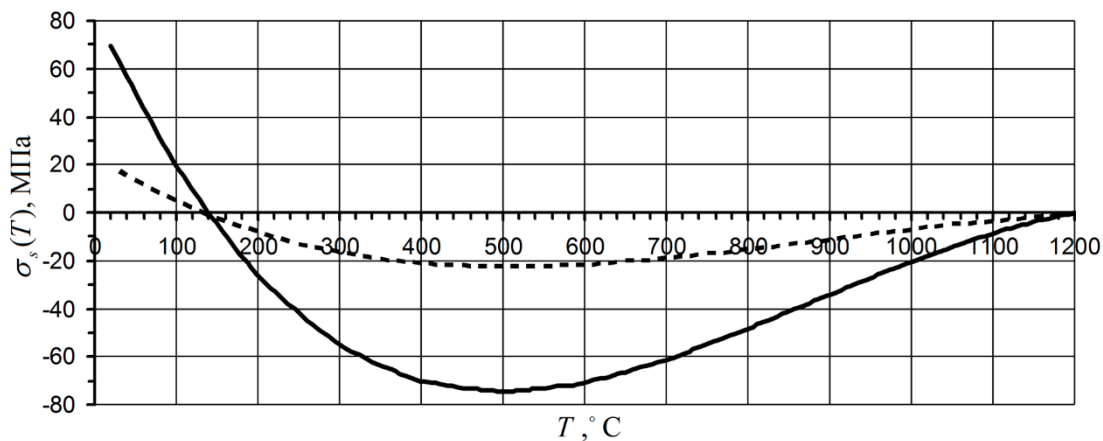


Рис.9. Температурные зависимости тепловых напряжений в подложке на границе раздела «подложка – покрытие»: — — — — — без учета изгиба; ————— с учетом изгиба.

Графики (рис.8,9) для 2D постановки строились на основе напряжений в КЭ, непосредственно прилегающих к границе раздела между подложкой и покрытием. В покрытии наблюдается снижение значений как растягивающих ($T > 137,6^{\circ}\text{C}$), так и сжимающих напряжений ($T < 137,6^{\circ}\text{C}$). В подложке ситуация противоположная – уровень действующих напряжений существенно увеличился в сравнении с ранее полученными результатами. Количественная оценка приведена в таблице 2.

Подобного рода поведение можно объяснить следующим образом. При $\alpha_l \neq \alpha_s$ изгиб пластины, наблюдающийся при охлаждении, должен приводить к линейному изменению напряжений по толщине. Так как граница раздела между подложкой и покрытием, вблизи которой и были вычислены температурные зависимости напряжений (рис.8,9), находится выше срединной поверхности конструкционной стенки, то, в зависимости от направления изгиба (рис.6), покрытию должны соответствовать либо сжимающие ($T > 137,6^{\circ}\text{C}$), либо растягивающие напряжения ($T < 137,6^{\circ}\text{C}$). Данные напряжения, отвечающие общему деформированному состоянию системы, частично компенсируют тепловые напряжения, вызванные разницей КТЛР $\Delta\alpha(T)$. Например, в покрытии за счет $\Delta\alpha(T)$ при $T = 500^{\circ}\text{C}$ растягивающие напряжения составляют порядка 221,632 МПа (без учета изгиба). Для этой температуры характерен изгиб пластины вогнутостью вверх (рис.6а), что должно приводить к сжимающим напряжениям в покрытии. Таким образом, учет изгиба приводит к снижению суммарного уровня напряжений в покрытии до 179,257 МПа. В подложке ситуация меняется на противоположную – напряжения от изгиба накладываются на напряжения от разницы КТЛР, приводя к увеличению их результирующего уровня.

ВЫВОДЫ

1. Аналитически исследовано НДС свободной от внешних усилий и закреплений конструкционной стенки «подложка – покрытие» при плавном тепловом нагружении. Рассмотрена односвязная задача термоупругости в постановке для плоского напряженного состояния. Оценка НДС осуществлена в безмоментном приближении (без учета изгибного деформирования) в предположении постоянства температуры по толщине стенки. Построены температурные зависимости тепловых напряжений в слоях стенки.
2. Построенное численное решение на базе метода конечных элементов краевой задачи классической термоупругости, соответствующей модели, положенной в основу аналитического решения, привело к идентичным результатам. Выявлены недостатки и ограничения, вносимые в решение рассматриваемыми допущениями.
3. Предложено уточненное решение задачи определения НДС в системе «подложка – покрытие» при тепловом нагружении на базе МКЭ, учитывающее изгибные деформации. Решение получено для полубесконечной пластины в постановке для обобщенной плоской деформации. Учет изгиба привел к существенному изменению уровня и характера распределения тепловых напряжений по толщине стенки. Показано, что расчет НДС без явного учета геометрической формы подложки даже в простейшем случае полубесконечной

пластины приводит к недопустимым погрешностям. Выработаны основные требования к конечно-элементным моделям, применяемым к исследованию НДС в системе «подложка – покрытие». Дальнейшие усложнения КЭ моделей могут быть направлены на учет возможного неупругого деформирования материалов слоев и их адгезионного/когезионного разрушения.

4. Оценка уровня и характера распределения напряжений позволяет научно подойти к разработке архитектуры покрытий (выбору химического и фазового состава слоев, их количества и толщин), а также существенно сократить количество 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. 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.
2. 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.
3. Биргер И.А. *Остаточные напряжения*. – М.: МАШГИЗ, 1963. – 232 с.
4. Коваленко А.Д. *Термоупругость*. – Киев: Вища школа, 1975. – 216 с.
5. Аппен А.А. *Температурустойчивые неорганические покрытия*. – Л.: Изд-во «Химия», 1976. – 296 с.
6. Тимошенко С.П., Гудьер Дж. *Теория упругости*. – М.: Наука, 1979. – 560 с.
7. Барвинок В.А. *Управление напряженным состоянием и свойства плазменных покрытий*. – М.: Машиностроение, 1990. – 384 с.
8. Вержбицкая Т.М., Лейпунский И.О., Малкин А.И. *Изучение процессов деградации защитных покрытий для углерод-углеродных композиционных материалов* // Известия Академии наук. Энергетика. – М.: Наука, 1996. – №6. – С.50-62.
9. 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.
10. 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.
11. Evans A.G., Mumm D.R., Hutchinson J.W. et al. *Mechanisms controlling the durability of thermal barrier coatings* // Progress in Materials Science. – 2001. – Vol.46(5). – Pp.505-553.

12. Mao W.G., Zhou Y.C., Yang L., Yu X.H. *Modeling of residual stresses variation with thermal cycling in thermal barrier coatings* // *Mechanics of Materials*. – 2006. – Vol.38(12). – Pp.1118-1127.
13. Fleck N.A., Cocks A.C.F., Lampenscherf S. *Thermal shock resistance of air plasma sprayed thermal barrier coatings* // *J. of the European Ceramic Society*. – 2014. – Vol.34(11). – Pp.2687-2694.
14. Астапов А.Н., Нуштаев Д.В. *Методика расчета НДС системы «жаропрочный материал – защитное покрытие»* / XXII Межд. симп. «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред». – М.: ООО «ТР-принт», 2016. – Т.1. – С.24-26.
15. 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.
16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. 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.
21. Горшков А.Г., Старовойтов Э.И., Тарлаковский Д.В. *Теория упругости и пластичности* – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2002. – 416 с.
22. *Abaqus User Manual [Электронный ресурс]: User manual. Version 6.14.* – USA.: Dassault Systemes Simulia Corp., 2014.

REFERENCES

1. 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 Journal of Non-Ferrous Metals*, 2016, Vol.57, No.2, Pp.157-173.
2. 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.
3. Birger I.A. *Ostatochnye napriazheniia [Residual stresses]*. Moskva, MASHGIZ, 1963, 232 p.

4. Kovalenko A.D. *Termouprugost' [Thermoelasticity]*. Kiev, Vishcha shkola, 1975, 216 p.
5. Appen A.A. *Temperaturostoichivye neorganicheskie pokrytiia [Temperature stable inorganic coatings]*. Leningrad, Izd-vo «Khimia», 1976, 296 p.
6. Timoshenko S.P., Gud'er Dzh. *Teoriia uprugosti [Elasticity theory]*. Moskva, Nauka, 1979, 560 p.
7. Barvinok V.A. *Upravlenie napriazhennym sostoianiem i svoistva plazmennyykh pokrytii [Stress state control, plasma coatings properties]*. Moskva, Mashinostroenie, 1990, 384 p.
8. Verzhbitskaia T.M., Leipunskii I.O., Malkin A.I. *Izuchenie protsessov degradatsii zashchitnykh pokrytii dlia uglerod-uglerodnykh kompozitsionnykh materialov [Study of degradation of protection coating degradation for carbon-carbon composite materials]*. Izvestiia Akademii nauk, Energetika, Moskva, Nauka, 1996, No.6, Pp.50-62.
9. Budinovskii S.A., Kablov E.N., Muboiadzhan S.A. *Primenenie analiticheskoi modeli opredeleniia uprugikh napriazhenii v mnogoslainoi sisteme pri reshenii zadach po sozdaniiu 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.
10. Astapov A.N., Zhavoronok S.I. *Raschet NDS v mnogoslainoi sisteme «podlozhka – funktsional'noe pokrytie» pri teplovom nagruzhении [Computation of the stress state in the multilayer substrate – functional coating system under thermal loading]*. Trudy vtoroi mezhdunarodnoi konferentsii «Deformirovanie i razrushenie kompozitsionnykh materialov i konstruksii» (DFCMS-2016), Moskva, Stolitsa, 2016, Pp.8-10.
11. Evans A.G., Mumm D.R., Hutchinson J.W. et al. *Mechanisms controlling the durability of thermal barrier coatings*. Progress in Materials Science, 2001, Vol.46(5), Pp.505-553.
12. Mao W.G., Zhou Y.C., Yang L., Yu X.H. *Modeling of residual stresses variation with thermal cycling in thermal barrier coatings*. Mechanics of Materials, 2006, Vol.38(12), Pp.1118-1127.
13. Fleck N.A., Cocks A.C.F., Lampenscherf S. *Thermal shock resistance of air plasma sprayed thermal barrier coatings*. J. of the European Ceramic Society, 2014, Vol.34(11), Pp.2687-2694.
14. 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»]*. Materialy XXII Mezhdunarodnogo simpoziuma «Dinamicheskie i tekhnologicheskie problemy mekhaniki konstruksii i sploshnykh sred», Moskva, OOO «TR-print», 2016, Vol.1, Pp.24-26.
15. 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.

16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. 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.
20. 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]*. Tezisy докладov Mezhdunarodnogo nauchnogo seminaru «Dinamicheskoe deformirovanie i kontaktное vzaimodeistvie tonkostennykh konstruksii pri vozdeistvii polei razlichnoi fizicheskoi prirody», Moskva, 2014, Pp.5-7.
21. Gorshkov A.G., Starovoitov E.I., Tarlakovskii D.V. *Teoriia uprugosti i plastichnosti [Elasticity and plasticity theories]*. Moskva, FIZMATLIT, 2002, 416 p.
22. *Abaqus User Manual [Elektronnyi resurs]: User manual. Version 6.14*. USA: Dassault Systemes Simulia Corp., 2014.

Поступила в редакцию 28 июня 2016 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