Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Политехнический институт
Кафедра «Прикладная механика»

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ А.Е. Майков
подпись инициалы, фамилия
« 26 » 06 20 16 г.

ДИПЛОМНЫЙ ПРОЕКТ

150301.65 «Динамика и прочность машин»

«Исследование причин и механизмов разрушения слоя Al_2O_3 в системах теплозащитных покрытий для лопаток газовых турбин»

Пояснительная записка

Руководитель 24.06.16 к.т.н., доцент Е.Н. Федорова
подпись, дата должность, ученая степень инициалы, фамилия

Выпускник 24.06.16 И.А. Шультин
подпись, дата инициалы, фамилия

Нормоконтролер 24.06.16 Д.Е. Грудцев
подпись, дата инициалы, фамилия

Красноярск 2016

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение
высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Политехнический институт
Кафедра «Прикладная механика»

УТВЕРЖДАЮ
Заведующий кафедрой
_____ И.Е. Мидяев
подпись инициалы, фамилия
« 25 » 01 20 10 г.

ЗАДАНИЕ
НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ
в форме дипломного проекта

Студенту (ке) *Шульгин Иван Александрович*

Группа *МТ 10-09* Направление (специальность) *150301.65 «Динамика и прочность машин»*

Тема выпускной квалификационной работы *Исследование причин и механизмов разрушения слоя Al_2O_3 в системах теплозащитных покрытий для лопаток газовых турбин*

Утверждена приказом по университету № 4021/с от 24.03.2016

Руководитель ВКР *Е. Н. Федорова доцент, к.т.н. каф. «Прикладная механика»*

Исходные данные для ВКР

а) образцы жаропрочных сплавов на основе никеля ЖС-26, ЖС-30, ЖС-32, ЖС-36, рабочая лопатка с системой ТЗП после циклических испытаний

Перечень разделов ВКР

а) Компоненты системы теплозащитных.
б) Основные причины разрушения и определение напряжений в системе ТЗП.
в) Экспериментальные исследование процесса высокотемпературного окисления сплавов на основе никеля.
г) Расчёт напряжений в системе ТЗП.
д) Экономическое обоснование проекта.
е) Безопасность и экологичность проекта.

Перечень графического или иллюстративного материала с указанием основных чертежей, плакатов, слайдов:

а) основные цели и задачи;
б) система теплозащитных покрытий;
в) анализ причин разрушения;
г) экспериментальное исследование по окислению образцов суперсплавов;
д) образец лопатки для расчета напряжений в системе ТЗП;
е) модель расчета напряжений;
ж) анализ расчетных напряжений;
з) заключение.

Руководитель ВКР _____ (подпись) Е. Н. Федорова

Задание принял к исполнению _____ (подпись) И. А. Шульгин

«25» 01 2016 г.

КАЛЕНДАРНЫЙ ГРАФИК
выполнения этапов ВКР

Наименование и содержание этапа	Срок выполнения	Примечание
1 Преддипломная практика	25.01.2016 – 21.02.2016	
2 Анализ исходных данных	03.03.2016 – 14.03.2016	
3 Обзор и анализ литературы по теме дипломного проекта	17.03.2016 – 28.03.2016	
4 Работа над теоретической частью проекта	31.03.2016 – 04.04.2016	
5 Безопасность и экологичность проекта	07.04.2016 – 18.04.2016	
6 Работа над экономической частью проекта	21.04.2016 – 02.05.2016	
7 Работа над практической частью проекта	05.05.2016 – 02.06.2016	
8 Оформление графической части проекта	03.06.2016 – 23.06.2016	
9 Оформление пояснительной записки дипломного проекта завершено	24.06.2016	

Руководитель выпускной квалификационной работы _____ Е. Н. Федорова
«25» 01 2016 г.

Студент МТ 10-09 _____ И. А. Шульгин
«25» 01 2016 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ 4
1 Компоненты системы теплозащитных покрытий 6
1.1 Керамический термобарьерный слой 7
1.2 Термически выросший оксидный слой 7
1.3 Жаростойкий слой 8
1.4 Жаропрочные сплавы на основе никеля 8
2 Основные причины разрушения и определение напряжений в системе ТЗП 8
2.1 Методы расчета напряжений в системе ТЗП 9
2.2 Влияние обработки поверхности жаростойкого слоя на механизмы разрушения ТЗП 12
2.3 Влияние усталости и ползучести на длительную прочность ТЗП 14
2.4 Напряжения, возникающие при изотермическом росте ТВО 18
3 Исходные материалы и методы экспериментальных исследований 20
4 Экспериментальные исследование процесса высокотемпературного окисления сплавов на основе никеля 25
5 Расчёт напряжений в системе ТЗП 30
5.1 Исходные образцы рабочих лопаток ГТД и результаты микроструктурных исследований 30
5.2 Исходные данные для расчета напряжений 35
5.3 Определение напряжений с использованием сферической модели ТЗП 36
5.3.1 Расчет напряжений, вызванных различием коэффициентов термического расширения у слоев ТЗП 37
5.3.2 Расчет напряжений, вызванных ростом оксидного слоя 39

5.4 Анализ полученных результатов расчета напряжений для объяснения причин разрушения ТЗП рабочей лопатки ГТД 42
6 Экономическое обоснование проекта 43
6.1 Единовременные затраты на НИР 43
6.2 Текущие затраты на выполнение НИР 44
6.3 Анализ расходов, связанных с проведением НИР 48
7 Безопасность и экологичность проекта 50
7.1 Анализ потенциальных опасностей и вредностей при работе на ПК 50
7.2 Технические решения по обеспечению безопасности проведения экспериментов 54
7.3 Производственная санитария помещения 56
7.4 Предупреждение аварий и взрывов 61
ЗАКЛЮЧЕНИЕ 66
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 67

ВВЕДЕНИЕ

Начиная с момента создания первых серийных газотурбинных двигателей (ГТД) в 1940-ых годах, главной задачей конструкторов является повышение эффективности работы и надежности данного типа двигателя, что требует повышения температуры рабочих газов в горячей секции ГТД. Сдерживающим фактором при этом является способность материалов, из которых изготовлены элементы ГТД, выдерживать механические нагрузки в условиях высоких температур и их резких перепадов, а также в условиях агрессивных сред.

Одним из методов повышения рабочей температуры лопаток является охлаждение потоком воздуха, продуваемым сквозь внутренние полости лопаток, что обеспечивает их работоспособность в условиях высоких (1000–1200°C) температур. Однако дальнейшее повышение температур рабочего газа при использовании такой схемы охлаждения затруднительно, поскольку оно ведет к увеличению теплового потока, подводимого к внешним поверхностям лопаток, что в сочетании с улучшением внутреннего охлаждения, ведет к повышению температурного перепада по толщине стенки. Это негативно сказывается на термоциклическом ресурсе лопаток.

Другим способом повышения температуры рабочего газа при сохранении ресурса лопаток является применение теплозащитных покрытий (ТЗП), обеспечивающих снижение теплового потока к основному материалу лопатки, что при условии его охлаждения, позволяет снизить его температуру, а также позволяет контролировать процесс окисления основного сплава при продолжительной выдержке в условиях высоких температур.

В данной работе рассмотрена система ТЗП, применяемая в лопатках ГТД, выполнен расчет напряжений, возникающих при росте оксидного слоя и резких перепадах температуры.

Целью дипломного проекта является анализ причин разрушения ТЗП рабочих лопаток ГТД и расчет напряжений, возникающих в покрытии при росте оксидного слоя и изменении температуры системы.

Основные задачи исследования:

1 Обзор литературных данных для выявления основных причин разрушения ТЗП и математических моделей для определения напряжений в ТЗП.

2 Проведение экспериментов по высокотемпературному окислению образцов отечественных жаропрочных сплавов на основе никеля.

3 Расчет термических напряжений и напряжений роста, возникающих в системе ТЗП при высокотемпературном воздействии.

4 Сопоставление полученных результатов расчета напряжений с микрофотографиями поперечных срезов ТЗП после окисления для определения причин разрушения покрытий.

5 Расчет затрат на выполнение НИР.

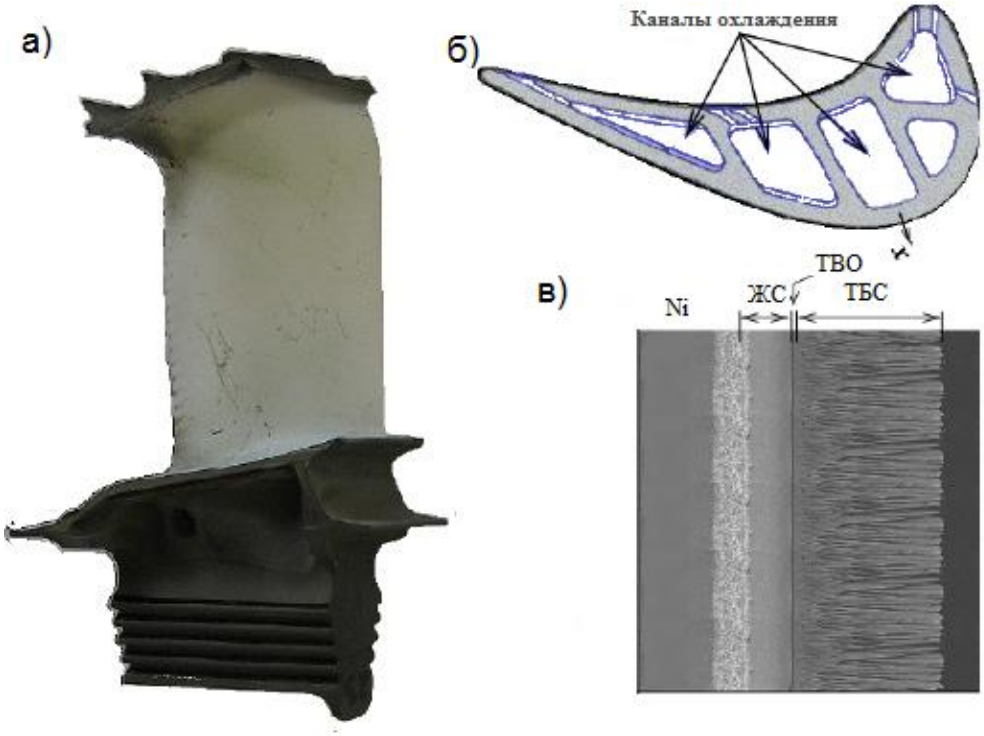
6 Определение основных элементов, формирующих опасные и вредные производственные факторы в ходе исследований, их количественная оценка и технические решения по обеспечению безопасности НИР.

1 Компоненты системы теплозащитных покрытий

Системы ТЗП современных лопаток ГТД (рисунок 1.1: а, б) состоят из следующих слоев (рисунок 1.1: в):

- жаростойкий слой (ЖС);
- слой термически выросшего оксида (ТВО);
- керамический термобарьерный слой (ТБС).

В последующих подразделах приведено описание назначения и свойств каждого из слоев ТЗП.



а) фотография лопатки ГТД; б) схематичное изображение лопатки ГТД в поперечном разрезе, в) схематичное изображение слоев ТЗП лопатки ГТД

Рисунок 1.1 – Рабочая лопатка ГТД и система ТЗП

1.1 Керамический термобарьерный слой

Основной задачей ТБС является снижение количества тепла, поступающего в расположенные ниже слои ТЗП, это достигается с помощью

применения диоксида циркония ZrO_2, стабилизированного иттрием Y_2O_3. Данный материал обладает пористой структурой, позволяющей ему исключить образование высоких напряжений в объеме, а также достаточно низким коэффициентом теплопроводности, равным 1.8 Вт/(м·К) [1].

При увеличении перепада температур в ходе эксплуатации, а также при увеличении толщины оксидного слоя увеличивается вероятность отслоения и последующего скалывания керамического покрытия [2].

Материал, используемый в ТБС, должен обладать следующими свойствами:

- низкий коэффициент теплопроводности;
- высокая температура плавления;
- отсутствие фазового превращения во всем диапазоне рабочих температур;
- коэффициент теплового линейного расширения (КТЛР) близкий к КТЛР расположенных ниже металлических слоев;
- высокая адгезия к оксиду алюминия Al_2O_3;
- стойкость к высокотемпературной коррозии.

1.2 Термически выросший оксидный слой

Данный слой состоит из оксида алюминия Al_2O_3, формирующегося при взаимодействии кислорода, проникающего из атмосферы. Основной задачей ТВО является контроль высокотемпературного окисления системы ТЗП. Принимая кислород, данный слой защищает основной сплав от создания менее стабильных оксидов, ведущих к преждевременному разрушению ТЗП. Как правило, именно рост ТВО вызывает увеличение напряжений в системе ТЗП вплоть до потери устойчивости слоев с последующим разрушением всей многослойной защитной системы лопатки, что приводит к выходу из строя ГТД [3–8]. Именно поэтому моделирование напряжений роста в ТВО является актуальной задачей и рассматривается в данной работе также, как

расчет напряжений, вызванных разностью коэффициентов линейного термического расширения (КТЛР).

1.3 Жаростойкий слой

Задачами данного сплава являются создание условий, необходимых для равномерного роста оксида алюминия Al_2O_3 на границе ЖС и ТБС, а также обеспечение плавного изменения КТЛР при переходе от ТВО к основному сплаву лопатки. Данный слой состоит из никеля (Ni), алюминия (Al), хрома (Cr), кремния Si, иттрия (Y) и гафния (Hf).

Добавление иттрия (0.01%) и гафния (1%) позволяет увеличить адгезию ЖС к основному сплаву. Кремний увеличивает жаростойкость покрытия. Хром уменьшает концентрацию алюминия, необходимую для образования его оксида Al_2O_3.

1.4 Жаропрочные сплавы на основе никеля

В качестве основного материала в лопатках ГТД используются сложнолегированные монокристаллические никелевые суперсплавы, обладающие следующими свойствами [9]:

- высокая жаропрочность и жаростойкость;
- иметь вязкость, достаточную для релаксации напряжений;
- способность сопротивляться высокотемпературной усталости;
- обладать хорошими литейными свойствами.

2 Основные причины разрушения и определение напряжений в системе ТЗП

2.1 Методы расчета напряжений в системе ТЗП

Авторами работы [10] рассмотрены механизмы разрушения ТЗП, причиной возникновения которых являются два действующих одновременно, но различных по своей природе, фактора: остаточные напряжения на границе раздела между жаростойким и оксидным слоями, возникающие при образовании слоя оксида алюминия и напряжения, действующие по всей толщине оксидного слоя, связанные с различными коэффициентами температурного расширения у слоев оксида алюминия и жаростойкого слоя.

Для расчета напряжений была использована упрощенная сферическая модель неровностей оксидного слоя (рисунки 2.1, 2.2), позволяющая максимально упростить расчет трехслойной структуры ТЗП, но не позволяющая учесть влияние ползучести и релаксации напряжений, присутствующих в реальной теплозащитной системе.

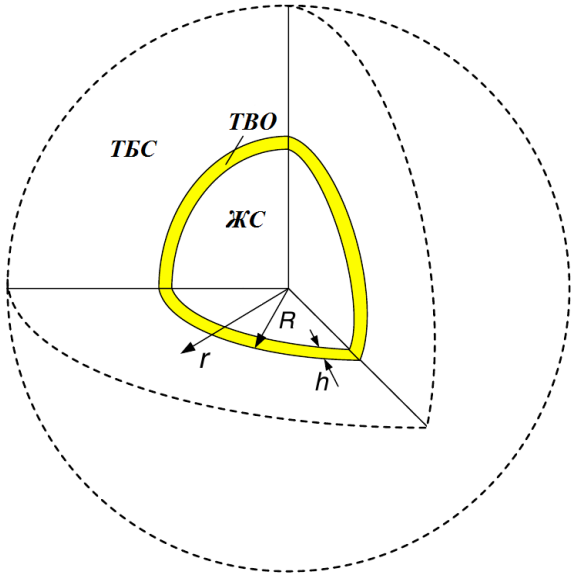


Рисунок 2.1 – Схематичное представление сферической модели ТЗП

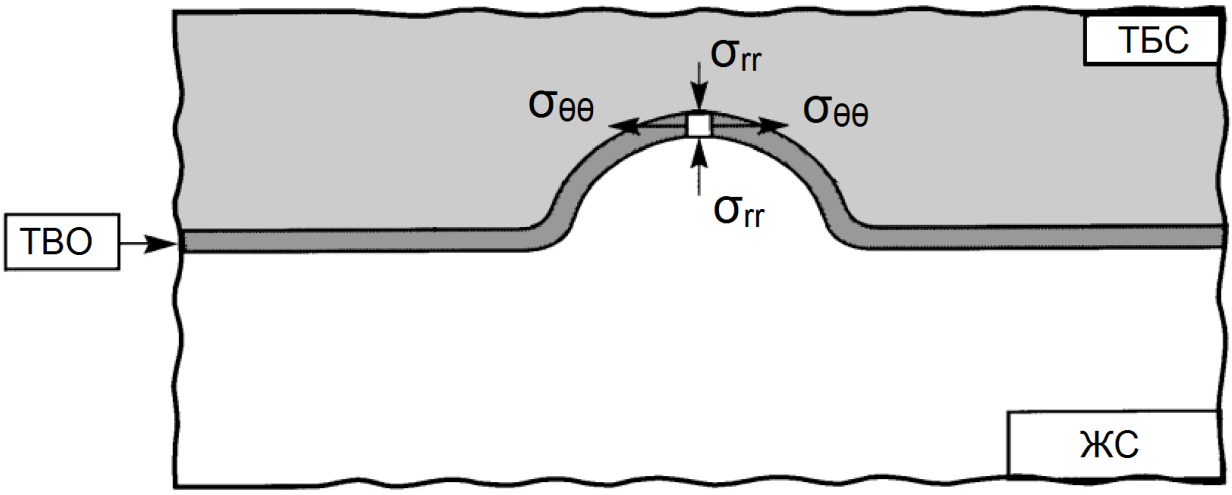


Рисунок 2.2 – Схематичное представление дефекта в ТЗП согласно сферической модели

Напряжения, вызванные разностью коэффициентов теплового линейного расширения, рассчитываются по формуле:

В жаростойком слое:

$$\sigma_{rr} = \sigma_{\theta\theta} = \Lambda(\alpha_{tbc} - \alpha_s), \quad (2.1)$$

при этом упругие постоянные определяются согласно выражениям:

$$\Lambda = 4k\mu\Delta T/[k + 4\mu/3]\,, \quad (2.2)$$

$$\mu = E_s/[2(1 + \nu_s)]\,, \quad (2.3)$$

$$k = E_s/[3(1 - 2\nu_s)]\,, \quad (2.4)$$

где α_{tbc} – коэффициент теплового линейного расширения керамического слоя;

α_s – коэффициент теплового линейного расширения жаростойкого слоя;

E_s – модуль Юнга жаростойкого слоя;

ν_s – коэффициент Пуассона жаростойкого слоя.

В оксидном слое:

$$\sigma_{rr} = \Lambda\{\alpha_{tbc} - \alpha_{tgo} - (\alpha_s - \alpha_{tgo})[(R-h)/r]^3\}, \quad (2.5)$$

где α_{tgo} – коэффициент теплового линейного расширения оксидного слоя;

$$\sigma_{\theta\theta} = \Lambda\{\alpha_{tbc} - \alpha_{tgo} + 0{,}5(\alpha_s - \alpha_{tgo})\,[(R-h)/r]^3\}, \quad (2.6)$$

где R-радиус кривизны, h-толщина оксидного слоя;

α_{tbc} – коэффициент теплового линейного расширения оксидного слоя.

Поскольку $\alpha_s > \alpha_{tbc} > \alpha_{tgo}$, оксидный слой всегда испытывает сжимающие окружные напряжения, а поверхность раздела между жаростойким и оксидным слоями растягивающие радиальные.

В керамическом слое:

$$\sigma_{rr} = -2\sigma_{\theta\theta} = -\Lambda\{\alpha_o - \alpha_{tbc} + (\alpha_s - \alpha_o)(1 - h/R)^3\}\,(R/r)^3 \quad (2.7)$$

Знак данного выражения зависит от толщины оксидного слоя, при малой толщине h слои испытывают сжимающие радиальные напряжения, а при увеличении толщины выше определенного значения (h_*) - растягивающие радиальные напряжения.

$$h_*/R = 1 - [(\alpha_{tbc} - \alpha_{tgo})/(\alpha_s - \alpha_{tgo})]^{1/3}$$

(2.8)

Напряжения на границе ТВО-ЖС определяются по формуле:

$$\sigma_o = E(\alpha_o - \alpha_s)\Delta T/(1-\nu). \quad (2.9)$$

Напряжения, вызванные ростом оксидного слоя, определяются с использованием следующих зависимостей:

В жаростойком слое:

$$\sigma_{rr} = \sigma_{\theta\theta} = -(2Eh(m-1))/(3(1-\nu)mR), \quad (2.10)$$

где m – соотношение между объемом образовавшегося оксида и объемом жаростойкого слоя, затраченным на окисление, в случае Al_2O_3, составляет 1,28.

В керамическом слое:

$$\sigma_{rr} = -2\sigma_{\theta\theta} = -2EhR^2(m-1)/[(3(1-\nu)mr^3]\,. \quad (2.11)$$

В оксидном слое:

$$\sigma_{rr} = -(2Eh(m-1))/(3(1-\nu)mR), \quad (2.12)$$

$$\sigma_{\theta\theta} = E(m-1)(r/R-(1-h/R))/[3(1-\nu)m]\,[r/R- -(1-h/R)]. \quad (2.13)$$

2.2 Влияние обработки поверхности жаростойкого слоя на механизмы разрушения ТЗП

В публикации [11] рассматривается влияние способа обработки поверхности жаростойкого слоя на прочность ТЗП.

Был проведен и описан ряд испытаний образцов с различными способами обработки:

- образцы жаростойкого подслоя без дополнительной обработки;
- образцы подслоя, обработанные ударами частиц Al_2O_3 крупного, среднего и мелкого размеров;

- отполированные образцы подслоя;

- отполированные, а затем обработанные ударами частиц Al_2O_3 крупного, среднего и мелкого размеров, образцы подслоя;

- предварительно окисленные образцы подслоя;

- образцы подслоя, содержащие дополнительный реактивный элемент (состав не уточняется), обработанные ударами частиц Al_2O_3 крупного, среднего и мелкого размеров.

По результатам экспериментов были сделаны выводы о том, что:

- дефекты поверхности подслоя оказывают ключевое влияние на скорость разрушения оксидного слоя, в качестве решения проблемы предложена полировка поверхности;

- скорость роста оксидного слоя оказывает влияние на напряжения на поверхности раздела между жаростойким и оксидным слоями, предварительное окисление образцов позволило значительно снизить скорость окисления, тем самым повысив прочность ТЗП в условиях непродолжительной работы при высоких температурах;

- использование специальных реактивных элементов в состав подслоя позволяет повысить сопротивляемость оксидного слоя к изменению геометрии, точная причина этого не установлена, но предположительно она кроется либо в повышении механических свойств жаростойкого слоя, либо в изменении его температуры мартенситного превращения.

2.3 Влияние усталости и ползучести на длительную прочность ТЗП

Авторами работы [12] рассматривается аналитическая модель поведения ТЗП при одновременном воздействии следующих, изменяющихся по нелинейному закону, факторов:

- температурный градиент;

- термическая усталость;

- воздействие остаточных напряжений;

- увеличение толщины оксидного слоя;

- упругие и пластические деформации керамического покрытия во время циклического изменения температуры;

Данная аналитическая модель была применена для моделирования проведенного ранее эксперимента, описанного в работе [13] со следующими характеристиками образцов:

- толщина основного сплава: 3,2 мм;
- толщина жаростойкого слоя: 75 мкм;
- способ обработки подслоя: ударами частиц Al_2O_3
- толщина оксидного слоя: 0,5 мкм;
- толщина керамического слоя: 150 мкм.

Условия термических испытаний:

- нагрев до 1121℃ в течение 10 минут;
- выдержка при 1121℃ в течение 40 минут;
- охлаждение до комнатной температуры в течение 10 минут с помощью нагнетаемого потока воздуха.

Для расчетов использовалась модель, схематическое представление которой показано на рисунке 2.3.

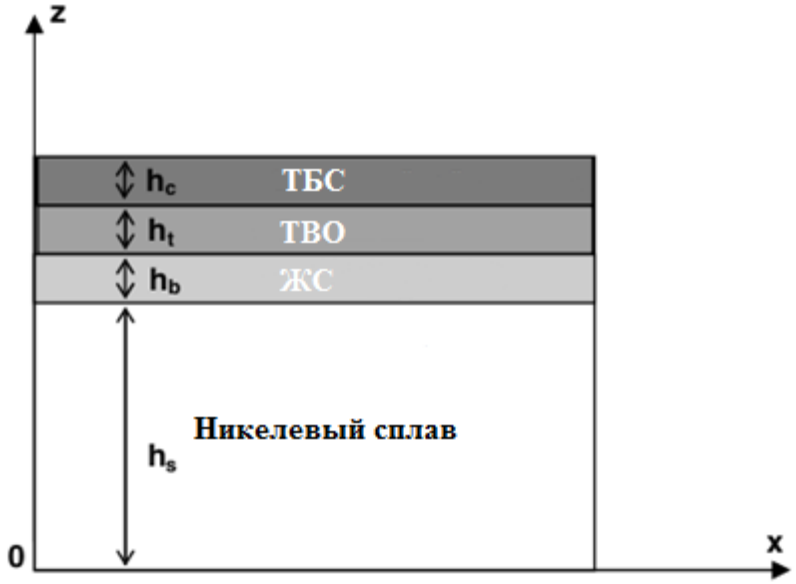


Рисунок 2.3 – Схема поперечного среза ТЗП

Поля напряжений в каждом последующем слое ТЗП определяются постепенно в каждый момент времени на заданном удалении от точки отсчета:

$$\mathrm{d}\varepsilon_{ij}(z,t) = de_{ij}^{e}(z,t) + \delta_{ij}\, d\varepsilon_m + \delta_{ij}\, \alpha(T) dT(z,t) + d\varepsilon_{ij}^{c}(z,t), \qquad (2.14)$$

где: $\mathrm{d}e_{ij}^{e}$ – приращение девиатора деформаций,

δ_{ij} – символ Кронекера,

$\mathrm{d}\varepsilon_{ij}^{c}$ – приращение средней деформации.

Для учета ползучести вводится уравнение:

$$d\varepsilon_{ij}^{c}(z,t) = F(t) f_1(z) A \cdot \exp(-Q/(RT(z,t))) \cdot \left(\sqrt{3J_2}/\sigma_0\right)^{n} \cdot \ (t/t_0\ )^{(-s)} dt =$$
$$= F(t) f_1(z) B(T) \cdot \ (t/t_0\ )^{(-s)} dt, \qquad (2.15)$$

где

$$B(T) = A \cdot \exp\left(-Q/(RT(z,t)\right) \cdot \left(\sqrt{3J_2}/\sigma_0\right)^{n}, \qquad (2.16)$$

$$F(t) = \begin{cases} 1, 0 < t < t_2 \\ 0, t_2 < t < t_3 \end{cases}; \qquad (2.17)$$

$$f_1(z) = \begin{cases} 0, 0 < z < h_t + h_b + h_s \\ 1, h_t + h_b + h_s < z < h_t + h_b + h_s + h_c \end{cases}, \qquad (2.18)$$

где A – константа материала;

Q – энергия начала ползучести,

n – константа напряжений для выбранного материала;

s – показатель времени.

Температурные поля описываются следующей закономерностью:

$$T(z,t)=\begin{cases}(T_1(z)-T_0)\cdot\frac{t}{t_1}+T_0, 0\le t\le t_1\\ T_1(z), t_1\le t\le t_2\\ T_1(z)-(T_1(z)-T_0)\cdot\frac{t-t_2}{t_3-t_2}, t_2\le t\le t_3\end{cases}, \quad (2.19)$$

где

$$T_1(z)=\begin{cases}(T_s-T_b)\cdot\frac{z}{h_c}+\left(T_b-h_1\cdot\frac{T_s-T_b}{h_c}\right),\\ h_t+h_b+h_s<z<h_t+h_b+h_s+h_c,\\ T_b, 0\le z\le< h_t+h_b+h_s\end{cases} \quad (2.20)$$

T_0 – температура окружающей среды,

$T_1(z)$ – температура слоев ТЗП во время высокотемпературной выдержки.

Приращения деформаций вычисляются по следующим формулам:

$$d\varepsilon_{33}(z,t)=-\frac{2\nu(T)}{E(T)}d\sigma(z,t)+\alpha(T)dT(z,t)+$$
$$+F(t)f_1(z)B(T)(t/t_0)^{-s}dt, \quad (2.21)$$

$$d\varepsilon_{11}(z,t)=d\varepsilon_{22}(z,t)=\frac{1-\nu(T)}{E(T)}d\sigma(z,t)+\alpha(T)dT(z,t)+$$
$$+F(t)f_1(z)B(T)(t/t_0)^{-s}dt. \quad (2.22)$$

Таким образом, приращения деформаций и напряжений, вызванных изменением температуры равны:

$$d\sigma_{th}(z,t)=-E(T)(F(t)f_1(z)B(T)(t/t_0)^{-s}/(1-\nu(T))dt+$$
$$+\alpha(T)dT(z,t)), \quad (2.23)$$

$$d\sigma_{eq}(z,t) = E(T) \cdot \left[d\varepsilon_{eq} - F(t)f_1(z)B(T)(t/t_0)^{-s}dt\right]/(1-\nu(T)) \quad (2.24)$$

Проинтегрировав, получим закон распределения напряжений в ТЗП при циклических изменениях температуры:

$$\sigma(z,t) = C + \int_0^t \frac{E(T)}{1-\nu(T)} \cdot [\left(\frac{d\varepsilon_{eq}}{dt}\right) - \alpha(T) \cdot$$
$$\cdot (dT(z,t)/dt) - 2f_1(z)F(t)B(T)(t/t_0)^{-s}]dt, \quad (2.25)$$

где C – постоянная интегрирования, учитывающая исходные напряжения в системе ТЗП.

Для описания роста оксидного слоя используется параболический закон:

$$h = \lambda_0 t^{\lambda_1}, \quad (2.26)$$

$$\lambda_0 = 10^{((\alpha_0/T)+b_0)}, \quad (2.27)$$

где h – толщина оксидного слоя,

t – время,

T – температура по Кельвину,

α_0 = - 4150, β_0 = 1,154, λ_1=0,45.

Таким образом, закон роста слоя ТВО можно записать в виде:

$$dh/dt = \lambda_0\lambda_1(h/\lambda)^{1-(1/\lambda_1)}. \quad (2.28)$$

Полученные в результате расчета результаты были достаточно близки к экспериментальным данным, отклонение составило ±0,2ГПа.

На основе данной модели были сделаны следующие выводы:

- большую роль в изменении геометрии оксидного слоя играет неравномерное распределение напряжений по его объему;

- текучесть, наблюдаемая в керамическом слое, способствует релаксации напряжений во всей системе ТЗП;

- в основном сплаве напряжения распределяются равномерно и не подвержены перераспределению под воздействием высоких температур;

- остаточные напряжения в системе ТЗП при циклическом нагреве увеличиваются медленно, это обусловлено пластическими деформациями и высокотемпературной ползучестью.

2.4 Напряжения, возникающие при изотермическом росте ТВО

В работе [14] описывается аналитическая модель расчета изменения напряжений в ТЗП при изотермическом росте оксидного слоя. Изменение геометрии оксидного слоя рассматривается в виде сферы. В расчете учитывается влияние ползучести керамического и оксидного слоев, локальный характер роста оксида, рассчитываются как действующие по нормали, так и направленные параллельно слоям напряжения.

Расчет производился с использованием следующих зависимостей.

Упругие деформации в жаростойком слое:

$$\dot{\varepsilon}_r^{bc} = \left(\dot{\sigma}_r^{bc} - 2\nu_{bc}\dot{\sigma}_\theta^{bc}\right)/E_{bc}, \tag{2.29}$$

$$\dot{\varepsilon}_\theta^{bc} = \left(1 - \nu_{bc}\right)\dot{\sigma}_\theta^{bc} - \nu_{bc}\dot{\sigma}_r^{bc}\right)/E_{bc}. \tag{2.30}$$

В оксидном слое суммарные деформации, состоящие из упругих, пластичных, а также деформаций, вызванных ползучестью и ростом оксида равны:

$$\dot{\varepsilon}_r^{tgo} = \left(\dot{\sigma}_r^{tgo} - 2\nu_{bc}\dot{\sigma}_\theta^{tgo}\right)/E_{tgo} + B_{tgo}\left(\dot{\sigma}_r^{tgo} - \dot{\sigma}_\theta^{tgo}\right) + C_{ox}h/h, \tag{2.31}$$

$$\dot{\varepsilon}_{\theta}^{tgo} = \left[\left(1-\nu_{tgo}\right)\dot{\sigma}_{\theta}^{tgo} - \nu_{tgo}\,\dot{\sigma}_{r}^{tgo}\right]/E_{tgo} + 0{,}5B_{tgo}\left(\sigma_{\theta}^{tgo} - \sigma_{r}^{tgo}\right). \quad (2.32)$$

По данным расчетам были сделаны следующие выводы:

- в начале эксперимента преобладающую роль в определении поведения системы играет рост оксидного слоя, а затем, с его замедлением, начинает преобладать ползучесть и влияние увеличения толщины оксидного слоя значительно уменьшается.

- керамический слой постоянно находится в состоянии радиального сжатия и окружного растяжения, которые усиливаются с ростом оксидного слоя

- чем тоньше начальный оксидный слой и чем выше скорость его роста в процессе нагрева, тем выше максимальные растягивающие напряжения в нем.

- влияние ползучести на систему ТЗП не однозначно, к примеру, ползучесть керамического слоя может увеличить растягивающие окружные напряжения в оксидном слое, а ползучесть в самом оксидном слое наоборот их уменьшает.

- наибольшую опасность в отношении срока службы лопатки представляют собой растягивающие напряжения в области, прилегающей к границе раздела с оксидным слоем, так как они могут являться причиной появления микротрещин, ведущих к отслоению.

Таким образом, при анализе литературных данных были проанализированы основные причины и механизмы разрушения ТЗП и выбрана модель для расчета напряжений.

3 Исходные материалы и методы экспериментальных исследований

В связи с тем, что при анализе литературных данных было выявлено значительное влияние процесса роста оксидного слоя на уровень

напряжений, возникающих в системе ТЗП, было принято решение провести эксперимент по окислению образцов жаропрочных сплавов на основе никеля, химический состав которых представлен в таблице 3.1

Таблица 3.1 – Химический состав исследуемых сплавов [15;16]

Сплав	Содержание элементов, мас.%											
	Cr	Co	Mo	Re	W	Al	C	Ta	Nb	B	Ce	Ni
ЖС-26	3,0-8,0	5,0-15,0	0,5-2,0	-	8,0-14,0	5,0-8,0	0,02-0,3	-	0,5-2,0	0,01-0,3	0,002-0,1	Основа
ЖС-30	6,5	8,0	0,5	-	0,5	5,15	0,14	-	1,2	-	-	Основа
ЖС-32	4,3-5,6	8,0-10,0	08,-1,4	3,5-4,5	7,7-9,5	5,6-6,3	0,12-0,18	3,5-4,5	1,4-1,8	0,02	0,025	Основа
ЖС-36	2,5-5,5	5,0-9,5	1,0-4,0	1,0-2,6	10,5-13,0	5,0-6,2	-	0,01-4,0	0,7-1,5	<0,01	0,0025	Основа

Образцы были нарезы из цилиндрических прутков, диаметры которых представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Диаметры образцов

ЖС-26	ЖС-30	ЖС-32	ЖС-36
d=9мм	d=7мм	d=8мм	d=10мм

Эксперименты проводились в лаборатории электронно-структурных исследований ЦКП СФУ. Резка образцов производилась с применением линейной прецизионной пилы Buehler Isomet 5000 (рисунок 3.1) с использованием отрезного диска с алмазным напылением (рисунок 3.2).

Рисунок 3.1 – Прецизионная пила Buehler Isomet 5000

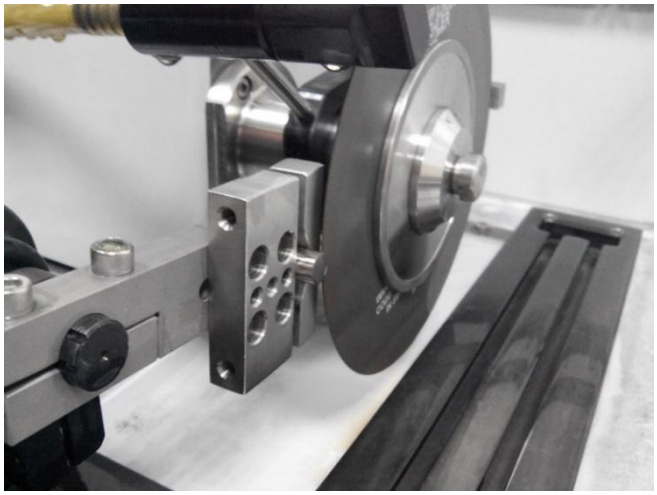


Рисунок 3.2 – Процесс резки образца

Толщина образцов контролировалась до и после операций шлифовки и полировки с помощью электронного штангенциркуля с точностью 0,01мм (рисунок 3.3).

Рисунок 3.3 – Контроль толщины полученных образцов

Далее, для подготовки поверхности к высокотемпературному окислению, образцы шлифовались и полировались.

Шлифовка проводилась на шлифовально-полировальной установке Buehler Vector (рисунок 3.4) с постоянной подачей воды. Были использованы шлифовальные бумаги на основе карбида кремния с зернистостью 2400мкм.

Рисунок 3.4 – Установка для шлифования и полирования образцов Buehler Vector

Конечным этапом обработки перед экспериментом была полировка образцов на тканевых дисках с помощью частиц алмаза размером 0-1мкм в составе на водной основе.

Для контроля качества поверхности и исследования поверхности оксидного слоя использовался оптический микроскоп Nikon LV-100 (рисунок 3.5).

Рисунок 3.5 – Оптический микроскоп Nikon LV-100

Образцы взвешивались до и после окисления, для контроля массы использовались весы Mettler Toledo AB204-S/FACT с точностью 0,1 мг (рисунок 3.6).

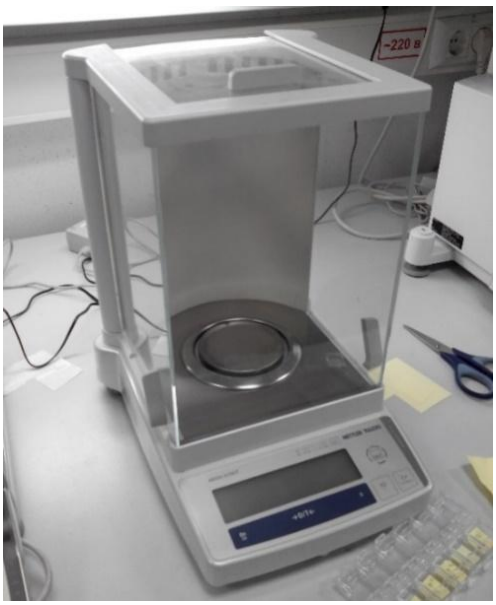


Рисунок 3.6 – Весы Mettler Toledo AB204-S/FACT

Образцы окислялись в течение 50 часов при температуре 1000°С в высокотемпературной печи WiseTherm (рисунок 3.7).

Рисунок 3.7 – Печь WiseTherm

После окисления было проведено исследование поверхности образцов с помощью оптического (рисунок 3.5) и сканирующего электронного микроскопов (рисунок 3.8).

Рисунок 3.8 – Электронный сканирующий микроскоп JEOL JSM-6490 LV

4 Экспериментальные исследование процесса высокотемпературного окисления сплавов на основе никеля

Образцы сплавов ЖС-26, ЖС-30, ЖС-32 и ЖС-36 окислялись в течение 50 часов при 1000˚С. Нагрев образцов производился со скоростью 10˚С/мин, а охлаждение 1,5˚С/мин Образцы были взвешены до и после окисления, на основе этих данных по формуле (4.1) была выполнена оценка толщины оксидных плёнок, образовавшихся в процессе эксперимента, согласно зависимости, предложенной в работе [17]:

$$t_{\text{окс}} = (m_{\text{окс}} \cdot \Delta m)/(3 \cdot m_0 \cdot \rho_{\text{окс}} \cdot S), \quad (4.1)$$

где $m_{\text{окс}}$ – молярная масса образующегося оксида (предполагая, что оксидный слой представляет собой α-Al_2O_3);

Δm – разница массы образца до окисления и после;

$\rho_{\text{окс}}$ – плотность оксидного слоя;

S – площадь образца.

Ннаименьшее изменение массы при окислении наблюдалось у сплава ЖС-32, а наибольший прирост массы у ЖС-36, что косвенным образом характеризует более высокую скорость окисления данного сплава. Расчетная толщина оксидного слоя максимальна у сплава ЖС-36, минимальна для ЖС-32. В таблицах 4.2–4.5 приведены изображения поверхностей сплавов ЖС-26, ЖС-30, ЖС-32 и ЖС-36 до и после окисления.

Таблицы 4.2 и 4.5 в версии для сайта не приводятся

По результатам проведенного эксперимента были сделаны следующие наблюдения:

- из числа испытанных сплавов ЖС-32 проявил наибольшую стойкость к высокотемпературному окислению, показав наименьшее относительное изменение массы и минимальную толщину оксидной плёнки;

- из изображений, полученных с помощью СЭМ, видно, что после окисления сплав ЖС-32 имеет наиболее однородную, мелкозернистую структуру по сравнению с другими исследуемыми сплавами.

5 Расчёт напряжений в системе ТЗП

5.1 Исходные образцы рабочих лопаток ГТД и результаты микроструктурных исследований

П.5.1 в версии для сайта не приводится

5.2 Исходные данные для расчета напряжений

Методом СЭМ были проанализированы поперечные срезы образца рабочей лопатки турбины, подвергнутой циклическим термическим испытаниям с нагревом до 1100˚С (рисунок 5.4), определены толщины слоев ТЗП и установлены основные механизмы разрушения и типы дефектов, а также их геометрические характеристики, радиус дефекта (в данном случае, радиус кривизны ТВО).

Исходные данные для расчета приведены в таблице 5.1, физические свойства материалов приняты согласно работе [10].

Таблица 5.1 – Исходные данные для расчета

Геометрические размеры слоев	
Толщина ЖС, мкм	30
Толщина ТВО (Al_2O_3), мкм	7
Толщина ТБС (ZrO_2-Y_2O_3), мкм	60
Радиус кривизны ТВО, мм	1,5
Керамический слой (ZrO_2-Y_2O_3)	
Коэффициент линейного термического расширения, α_{tbc}, C^{-1}	$9 \cdot 10^{-6}$
Модуль Юнга, E_{tbc}, ГПа	48[1]
Коэффициент Пуассона, ν_{tbc}	0,23
Оксидный слой (Al_2O_3)	
Коэффициент линейного термического расширения, α_{tgo}, C^{-1}	$8 \cdot 10^{-6}$

Модуль Юнга, E_{tgo}, ГПа	380
Коэффициент Пуассона, ν_{tgo}	0,24
Жаростойкий слой	
Коэффициент линейного термического расширения, α_s, C^{-1}	$13{,}6 \cdot 10^{-6}$
Модуль Юнга, E_s, ГПа	138
Предел текучести, σ_s, МПа	426
Коэффициент Пуассона, ν	0,3

5.3 Определение напряжений с использованием сферической модели ТЗП

Для расчета напряжений была выбрана сферическая модель, предложенная Эвансом [10], которая представлена в разделе 2.1.

Исходные данные взяты из таблицы 5.1.

5.3.1 Расчет напряжений, вызванных различием коэффициентов термического расширения у слоев ТЗП

Определим термические напряжения в жаростойком слое.

Радиальные (σ_{rs}) и окружные ($\sigma_{\theta s}$) напряжения составили:

$$\sigma_{rs} = \sigma_{\theta s} = (-1{,}42 \cdot 10^{14}(11 \cdot 10^{-6} - 11 \cdot 10^{-6}) = 142 \text{ МПа},$$

На границе между оксидным и жаростойким слоями нормальные напряжения определяются по формуле:

$$\sigma_{ob} = 138 \cdot 10^{9}(8 \cdot 10^{-6} - 13{,}6 \cdot 10^{-6})(-1080)/(1 - 0{,}24) = 784$$
МПа.

В оксидном слое:

$\mu_{tgo} = (380 \cdot 10^9)/[2(1 + 0{,}24)] = 1{,}53 \cdot 10^{11}$ Па;

$k_{tgo} = (380 \cdot 10^9)/[3(1 - 2 \cdot 0{,}24)] = 2{,}44 \cdot 10^{11}$ Па;

$\Lambda_{tgo} = [4 \cdot 2{,}44 \cdot 10^{11} \cdot 1{,}53 \cdot 10^{11} \cdot (-1080)]/[2{,}44 \cdot 10^{11} +$
$+0{,}75 \cdot 1{,}53 \cdot 10^{11}] = -3{,}6 \cdot 10^{14}$ Па;

$\sigma_{rtgo} = (-3{,}6) \cdot 10^{14}\{9 \cdot 10^{-6} - 8 \cdot 10^{-6} - (13{,}6 \cdot 10^{-6} - 8 \cdot$
$10^{-6})[(1{,}5 \cdot 10^{-3} - 7 \cdot 10^{-6})/(1{,}496 \cdot 10^{-3})]^3\} = 349$ МПа,

$\sigma_{\theta tgo} = (-3{,}6) \cdot 10^{14}\{9 \cdot 10^{-6} - 8 \cdot 10^{-6} + 0{,}5(13{,}6 \cdot 10^{-6} - 8 \cdot$
$\cdot 10^{-6})[(1{,}5 \cdot 10^{-3} - 7 \cdot 10^{-6})/(1{,}496 \cdot 10^{-3})]^3\} = -1795$ МПа.

В керамическом слое:
$\mu_{tbc} = (48 \cdot 10^9)/[2(1 + 0{,}24)] = 2{,}16 \cdot 10^{10}$ Па,

$k_{tbc} = (48 \cdot 10^9)/[3(1 - 2 \cdot 0{,}24)] = 2{,}05 \cdot 10^{10}$ Па,

$\Lambda_{tbc} = [4 \cdot 2{,}05 \cdot 10^{10} \cdot 2{,}16 \cdot 10^{10} \cdot (-1080)]/[2{,}05 + 0{,}75 \cdot 2{,}16 \cdot$
$\cdot 10^{10}] = -3{,}88 \cdot 10^{13}$ Па,

$\sigma_{rr\,tbc} = -2\sigma_{\theta\theta tbc} = 3{,}88 \cdot 10^{13}\{8 \cdot 10^{-6} - 9 \cdot 10^{-6} + (13{,}6 \cdot 10^{-6} - 8 \cdot$
$\cdot 10^{-6})(1 - (7 \cdot 10^{-6})/(1{,}5 \cdot 10^{-3}))^3\}((1{,}5 \cdot 10^{-3})/(1{,}493 \cdot 10^{-3}))^3 =$
$= 36{,}2$ МПа.

Результаты расчетов термических напряжений для различных слоев ТЗП представлены на рисунках 5.9 и 5.10.

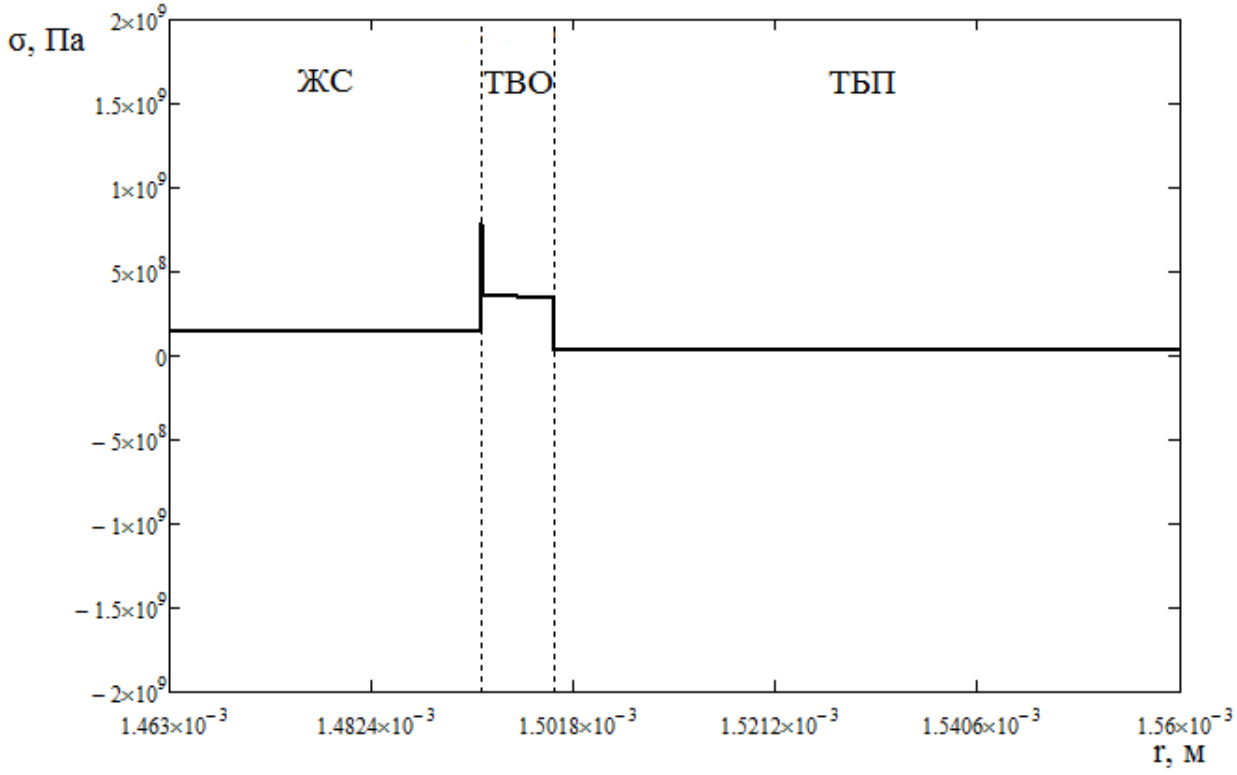


Рисунок 5.9 – График зависимости радиальных термических напряжений от расстояния от центра кривизны

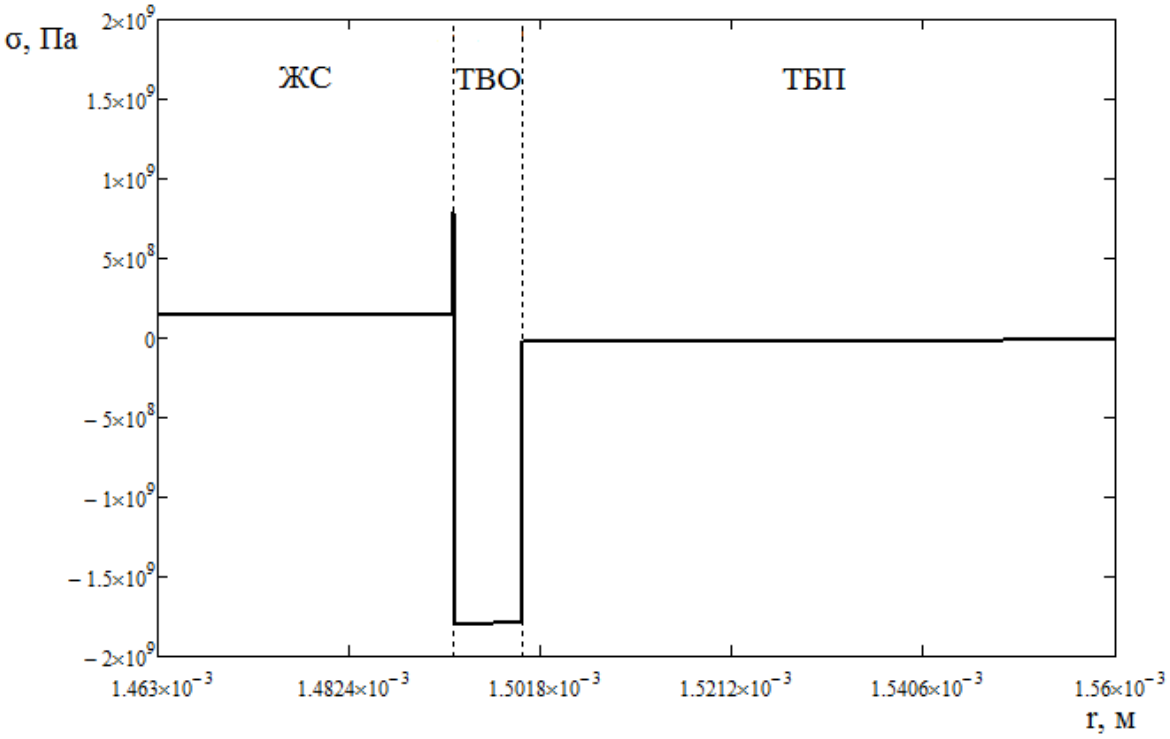


Рисунок 5.10 – График зависимости окружных термических напряжений от расстояния от центра кривизны

Наибольшие растягивающие окружные термические напряжения, наблюдаются на границе раздела между жаростойким и оксидным слоями, их значение составило 784 МПа. Наибольшие сжимающие окружные термические напряжения наблюдаются также в ТВО и составляют -1795 МПа. Уровень расчетных напряжений сопоставим с литературными экспериментальными и расчетными данными, которые в зависимости от условий высокотемпературного воздействия и методов расчета составляют от 1,5 до 5 ГПа [21]. Сочетание этих двух факторов позволяет предположить, что разрушение ТЗП произойдет в оксидном слое вблизи его границы с жаростойким слоем, либо по границе раздела ЖС-ТВО.

5.3.2 Расчет напряжений, вызванных ростом оксидного слоя

Рассчитаем напряжения, вызванные ростом ТВО, в отдельных слоях ТЗП:

В жаростойком слое:

$$\sigma_{rgs} = \sigma_{\theta} = -\frac{2\cdot 380\cdot 10^{9}(1{,}28-1)}{3(1-0{,}24)1{,}28}\frac{7\cdot 10^{-6}}{1{,}5\cdot 10^{-3}} = -134 \text{ МПа.} \quad (5.12)$$

В керамическом слое:

$$\sigma_{rgtbc} = -\frac{2\cdot 380\cdot 10^{9}(1{,}28-1)}{3(1-0{,}24)1{,}28}\frac{7\cdot 10^{-6}}{1{,}5\cdot 10^{-3}}\left(\frac{1{,}5\cdot 10^{-3}}{1{,}493\cdot 10^{-3}}\right)^{3} = -104 \text{ МПа.} \quad (5.13)$$

$$\sigma_{\theta gtbc} = (-0{,}5)\sigma_{rgtbc} = 52 \text{ МПа.} \quad (5.14)$$

В оксидном слое:

$$\sigma_{rgtgo} = -\frac{2\cdot 380\cdot 10^{9}(1{,}28-1)}{3(1-0{,}24)1{,}28}\frac{7\cdot 10^{-6}}{1{,}5\cdot 10^{-3}} = 123 \text{ МПа,} \quad (5.15)$$

$$\sigma_{\theta gtgo} = \frac{2\cdot 380\cdot 10^9(1{,}28-1)}{3(1-0{,}24)1{,}28}\left[\frac{1{,}493\cdot 10^{-3}}{1{,}5\cdot 10^{-3}} - \left(1 - \frac{7\cdot 10^{-6}}{1{,}5\cdot 10^{-3}}\right)\right] = 52 \text{ МПа}. \qquad (5.16)$$

Радиальные напряжения, вызванные ростом ТВО (рисунок 5.11), являются сжимающими и равномерно распределены по всем слоям ТЗП. Их максимум наблюдается ближе к центру лопатки, где они равны -340 МПа. По мере приближения к внешней грани лопатки их значение уменьшается и достигает минимального значения 303 МПа, на внешней грани ТБС.

Окружные напряжения, вызванные ростом ТВО (рисунок 5.12), являются сжимающими в ЖС (-340 МПа), ТВО находится под действием растягивающих окружных напряжений, увеличивающихся от 5 МПа на границе с ЖС, до 167 МПа на границе с керамическим покрытием, которое находится под воздействием растягивающих напряжений, равных 5 МПа.

Необходимо также отметить, что по сравнению с термическими напряжениями, напряжения роста в слое ТВО незначительны, что подтверждают многочисленные литературные данные [22; 23].

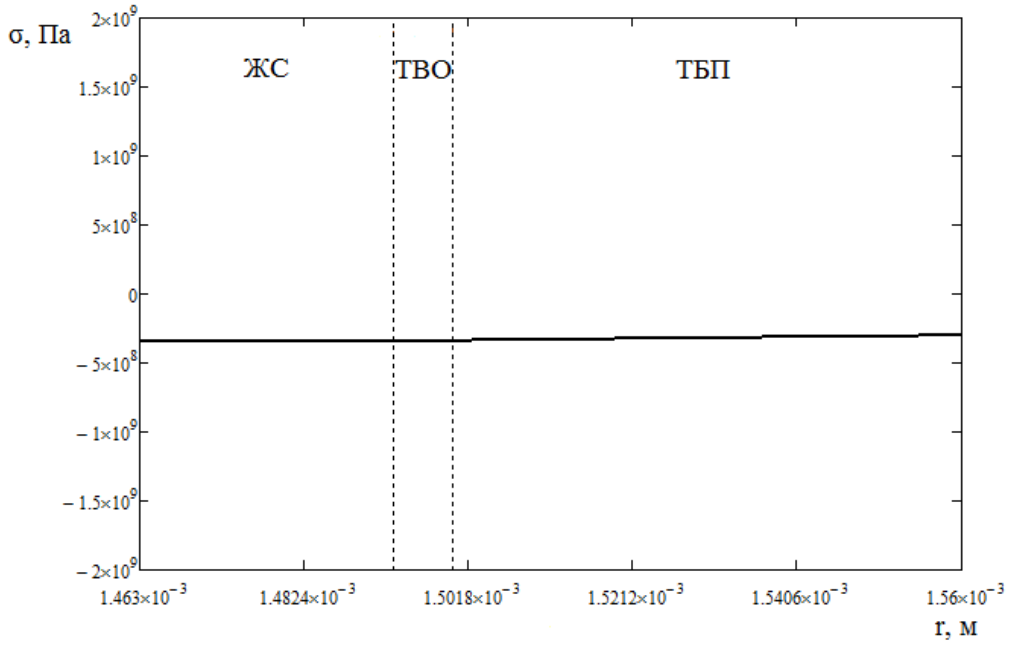


Рисунок 5.11 – График зависимости радиальных напряжений, вызванных ростом оксидного слоя, от расстояния от центра кривизны

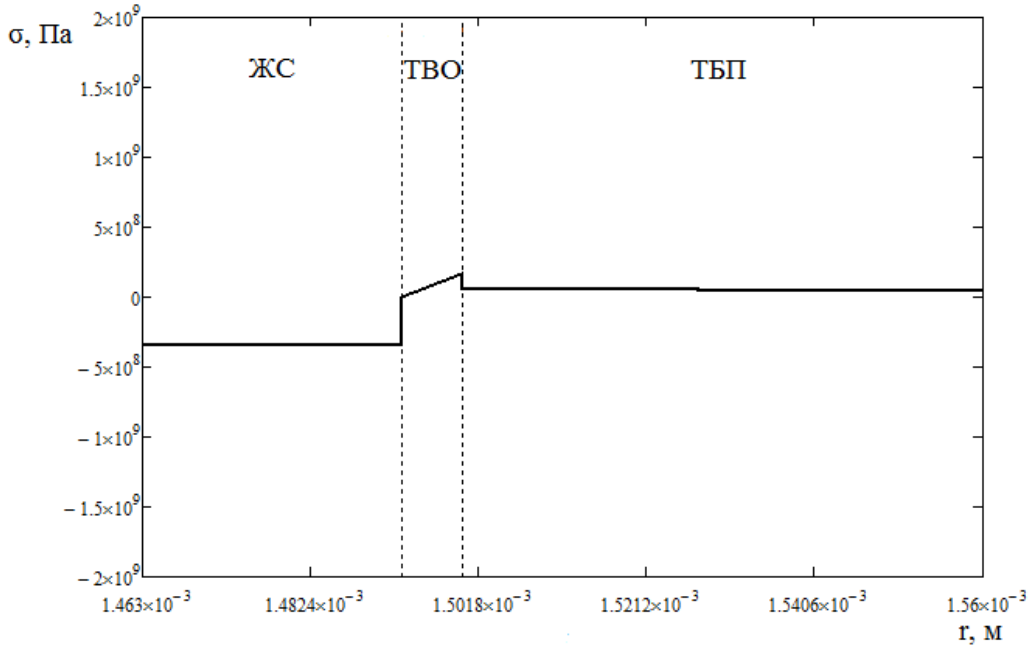


Рисунок 5.12 – График зависимости окружных напряжений, вызванных ростом оксидного слоя, от расстояния от центра кривизны

5.4 Анализ полученных результатов расчета напряжений для объяснения причин разрушения ТЗП рабочей лопатки ГТД

Проведенные в ходе данной работы расчеты показывают, что при росте ТВО и резких перепадах температуры наибольшие напряжения в системе ТЗП возникают в оксидном слое, что соответствует процессам разрушения, наблюдаемым в рассмотренном образце, а также экспериментам и исследованиям, проведенным ранее другими исследователями [3-8, 13]. На основании этого, можно считать выбранную модель [10] адекватной и приемлемой для расчета напряжений в системе ТЗП, что позволят прогнозировать толщину оксидного слоя, при которой произойдет разрушение ТЗП.

Использование данной модели расчета позволит сократить затраты, необходимые на проведение экспериментальных исследований, связанных с определением прогнозируемого срока службы лопатки, что в свою очередь позволит использовать освободившиеся ресурсы для разработки

принципиально новых сплавов, превосходящих ныне существующие композиции.

6 Экономическое обоснование проекта

6.1 Единовременные затраты на НИР

Данный дипломный проект носит научно-исследовательский характер, результатом которого является исследование возможности расчета напряжений в системе ТЗП лопаток ГТД.

При проведении научно-исследовательской работы (НИР) возникает ряд затрат, необходимых для её выполнения. Затраты на выполнения НИР и проведение экспериментов подразделяются на единовременные и текущие [24]. Единовременные затраты состоят из вложения в лабораторное оборудование, то есть всё то, что необходимо для выполнения НИР. При этом учитывается стоимость как вновь приобретаемого оборудования, так и уже имеющегося в распоряжении. Смета затрат на выполнение работ составляется по следующим статьям затрат:

- материальные затраты;
- расходы на оплату труда;
- амортизация оборудования;
- прочие расходы.

Временные затраты на разработку дипломного проекта характеризуется данными, приведенными в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Расчет времени, трудоемкость

Вид выполняемых работ	Трудоемкость разработки, чел·ч.	Затраты машинного времени, ч.
Постановка задачи	30	20
Сбор данных	50	50
Анализ литературных данных	50	50

Оформление анализа данных	40	40
Обработка данных расчетов	50	50
Оформление данных расчета	40	40

Окончание таблицы 6.1

Проведение экспериментов	80	10
Анализ и оформление экспериментальных данных	120	120
Оформление экономической части	60	60
Оформление части БЖД	60	60
Итого:	580	500

6.2 Текущие затраты на выполнение НИР

Материальные затраты включают в себя стоимость приобретенных со стороны материалов и сырья, комплектующих изделий, полуфабрикатов, топлива, энергии. Стоимость расходных материалов, использованных в проекте указана в таблице 6.2.

Таблица 6.2 – Стоимость расходуемых материалов

Наименование материала	Количество, шт.	Стоимость за одну штуку, руб.	Суммарная стоимость, руб.
Тонер для лазерного принтера	1	350	350
Бумага А4	2	200	400
Ручка шариковая	3	6	18
Тетрадь 96 листов	1	50	50
Бахилы	20	5	100
Итого:			818

В состав материальных расходов входит стоимость расходуемой электроэнергии, а также затрат на использование прикладных программ.

Цена за 1кВт·час (c_1) равна 1,45 рублей. Необходимо подсчитать количество расходуемой энергии компьютером. Мощность используемого оборудования составляет:

монитор – 300 Вт;

системный блок – 400 Вт;

принтер – 10Вт (усреднённое значение за весь период НИР);

Суммарная мощность(W) составляет 710Вт, время работы за компьютером 500 часов. Суммарный расход электроэнергии составляет 355кВт·ч, посчитаем её стоимость:

$$C_{\text{расх.эл.}} = W \cdot c_1 = 514{,}8\text{руб.} \quad (6.1)$$

Затраты по использованию прикладных программ:

- Windows 10 – 7900руб;
- Microsoft Office 365 – 3090руб;
- Mathcad Professional – 6990руб.

$$C_{\text{пр}} = 7900 + 3090 + 6990 = 17980\text{руб},$$

В сумме все материальные затраты равны:

$$C_{\text{мат}} = 818 + 514{,}8 + 17980 = 19312.8\text{руб.}$$

Затраты по статье «Основная заработная плата персонала» включают основную и дополнительную заработную плату научных и инженерно–технических работников, рабочих и служащих отделов, лабораторий, занятых в НИР, включая заработную плату научного руководителя. В этой работе затраты рассчитываются для заработной платы инженера 12-ого разряда и руководителя проекта 15-ого разряда (таблица 6.3).

Таблица 6.3 – Основная заработная плата

Работник	Трудоемкость, мес.	Разряд	Тарифный коэффициент	Ставка, руб.	Коэффициент районных затрат	Заработная плата
Руководитель проекта	4	15	3,625	2900	1,6	16820
Инженер	4	12	2,894	2315	1,6	10719,4
Итого:						27539,4

Рассчитаем дополнительную заработную плату, определяемую в процентной надбавке к основной заработной плате

$$З_д = З_{осн} \cdot 0{,}1 = 2753{,}94 руб, \quad (6.2)$$

где $З_{осн}$ – основная зарплата.

Посчитаем полную заработную плату, равную сумме основной и дополнительной заработных плат

$$З_п = 27539{,}4 + 2753{,}94 = 30293 руб.$$

Расчет амортизационных отчислений

Срок полезного использования оборудования установлен равным 5 годам. Для расчета амортизационных отчислений используется линейный метод, следовательно, норма амортизационных отчислений составит 20% в год. Сумма амортизационных отчислений вычисляется по формуле (6.5):

$$А_{м.акт} = С_{об} \cdot \frac{Н}{100}, \quad (6.3)$$

где $А_{м.акт}$– годовая стоимость амортизационных отчислений по материальным активам, руб.;

$С_{об}$– стоимость оборудования, руб. (таблица 6.4);

Н – норма амортизационных отчислений, в процентах.

Таблица 6.4 – стоимость оборудования

Наименование оборудования	Единица измерения, шт.	Стоимость, руб.
Системный блок (Core i5-3570K, 16Gb, 256Gb, 500Gb, nVidia 750Ti)	1	50300
Монитор 27	1	17800
Принтер	1	5000
Мышь	1	1150
Клавиатура	1	2250
ИТОГО:		76500

По данным таблицы 6.4 посчитаем амортизационные отчисления:

$$А_{м.акт} = 76500 \cdot \frac{20}{100} = 15300руб.$$

Время работы с оборудованием составило 500ч, отсюда износ оборудования будет равен

$$C_{изн} = \frac{500 \cdot А_{м.акт}}{1920} = 3984руб. \quad (6.4)$$

Отчисления на социальные нужды

Налог ЕСН составляет 34%, рассчитаем сумму социальных отчислений по формуле (6.8):

$$О_{ЕСН} = З_{п} \cdot 0{,}34 = 10300руб. \quad (6.5)$$

Затраты по использованию INTERNET

Сумма отчислений на интернет составила 1600 руб.

Пользование информацией всемирной сети INTERNET включает:

- обновления к старым, уже имеющимся программам;
- документация по программным продуктам;
- поиск данных по теме исследуемого вопроса;
- другая информация, применяемая в работе.

Накладные расходы.

Накладные расходы показывают расходы по содержанию и ремонту зданий, сооружений, инвентаря; расходы по содержанию управленческого персонала в ходе проведения НИР. Их принимают в размере от 60 до 80 % от суммы общей заработной платы научно-технического персонала. Рекомендуется в расчетах процент накладных расходов, принятый в базовой организации. Для СФУ он составляет 65 % формула (6.9):

$$Р_{накл} = 0{,}65 \cdot З_п = 19690{,}5 руб \quad (6.6)$$

6.3 Анализ расходов, связанных с проведением НИР

На основании полученных данных составляется смета затрат на выполнение работ (таблица 6.5).

Таблица 6.5 – Смета затрат

Статья затрат	Сумма, руб.
Материальные затраты	19313
Полная заработная плата	30293
Амортизация оборудования	3984
Единый социальный налог	10300

Окончание таблицы 6.5

Затраты по использованию INTERNET	1600
Накладные расходы	19690
Итого:	76873

Суммарные затраты на НИР составили 85180руб.

7 Безопасность и экологичность проекта

Анализ производственных и бытовых несчастных случаев показывает, что нет такой сферы деятельности, где человек не подвергается действию опасных и вредных факторов. Отсюда можно сделать вывод: любая деятельность потенциально опасна. Производственная среда, являющаяся предметом окружения человека, должна сочетать в себе рациональные архитектурно-планировочные решения, оптимальные санитарно-гигиенические условия (микроклимат, освещение, отопление, вентиляцию, электробезопасность, пожарную безопасность), создание удобных для работы интерьеров. В данном разделе рассмотрены меры безопасности при поиске аналитических моделей расчета напряжений, возникающих в ТЗП лопаток ГТД.

Площадь лаборатории S=12 м², высота помещения H=2,5 м, объем

помещения равен V=30 м³. Во время проведения испытаний в помещении находится один человек, который занят в проведении испытаний. Таким образом, на одного человека приходится площадь S=12 м², а объем помещения составляет V=30 м³. По санитарным нормам СанПиН 2.2.4.548-96 [25] для обеспечения нормальных условий труда на одного работающего объем производственного помещения устанавливается не менее 15 м³. Опираясь на вышеизложенные цифры можно сказать, что лаборатория удовлетворяет требованиям санитарных норм. Разработка дипломного проекта производится в помещении, оснащенном персональным компьютером (ПК).

7.1 Анализ потенциальных опасностей и вредностей при работе на ПК

Длительная работа на ПК может отрицательно воздействовать на

здоровье человека. Компьютер и, прежде всего, монитор, является источником электростатического поля, слабых электромагнитных излучений в низкочастотном и высокочастотном диапазонах (2 Гц – 400 КГц), рентгеновского, ультрафиолетового, инфракрасного излучения и излучения видимого диапазона. Неподвижно напряженная поза пользователя компьютера в течение длительного времени приводит к усталости и появлению болей в позвоночнике, плечевых суставах, шее. Работа на клавиатуре вызывает болевые ощущения в локтевых суставах, кистях и пальцах рук. Наиболее сильной нагрузке подвергается зрительный анализатор. В случаях, когда характер работы требует постоянного взаимодействия с видеодисплейным терминалом (ВДТ) (набор текстов или ввод данных и т.п.) с напряжением внимания и сосредоточенности, при исключении возможности периодического переключения на другие виды трудовой деятельности, не связанные с ПК, рекомендуется организация перерывов на 15 минут через каждые 60 минут работы. Во время перерывов с целью снижения нервно-эмоционального напряжения, утомления зрительного анализатора, устранения влияния гиподинамии и т.д. целесообразно выполнять комплексы несложных физических упражнений и массаж наиболее нагруженных частей тела. Данное помещение согласно ПУЭ-86 относится к помещениям без повышенной опасности, для питания ПК используется однофазная сеть переменного электрического тока напряжением 220 В, силой тока 5 А и частотой 50 Гц. В процессе эксплуатации вычислительной техники возникает вероятность поражения обслуживающего персонала электрическим током. Пожары могут нанести ущерб жизни и здоровью человека.

Основными поражающими факторами будут ожоги и отравление продуктами сгорания. Источником загорания в данном помещении могут быть электронные схемы ПЭВМ, устройства электропитания. В современном компьютере очень высокая плотность размещения электронных плат. В непосредственной близости находятся соединительные провода, при

протекании по ним электрического тока выделяется значительное количество

теплоты, что может привести к повышению температуры, может произойти плавление изоляции проводов. Вследствие этого может произойти короткое замыкание и возможное возгорание.

Данное помещение в соответствии с НПБ105-95 [26], по пожарной опасности относится к категории «В».

По огнестойкости, согласно СНиП 21-01-97 [27], данное помещение относится ко 2-ой степени огнестойкости, для которой необходимо, чтобы предел огнестойкости несущих стен, полок был не менее 2,5 часов лестничных площадок не менее 1 часа, наружных стен перегородок и покрытий не менее 0,5 часа. Данное помещение по характеру освещения относится к 5 разряду, подразряд «а» (зрительная работа малой точности: размер объекта от 1 до 5 мм). Недостаточная освещенность рабочего места, нерациональное или неправильное расположения осветительных приборов, может привести к ухудшению или потери зрения, быстрой утомляемости, снижению работоспособности персонала.

К техническим средствам, создающим шум можно отнести вентиляторы,

встроенные в ПК. Эти приборы создают уровень звукового давления ниже допустимого уровня, то есть по уровню шума являются неопасными для жизни и здоровья оператора. В рабочем помещении нужно создать благоприятный микроклимат, для повышения работоспособности и оптимальный для здоровья оператора. Работа операторов ПЭВМ соответствует 1-ой легкой категории работ. В соответствии с СанПиН 2.2.4.548-96 [28] в рабочей зоне нормируются температура, относительная влажность и скорость движения воздуха.

Любой монитор, основным элементом которого является электроннолучевая трубка (ЭЛТ), создает электрические и магнитные поля, избежать появления которых полностью не удается по причинам технологического характера. Согласно СанПиН 2.2.2.542-96 [26] значения параметров электромагнитных излучений не должны превышать значений, приведенных в таблице 14. Монитор «Samsung», на котором выполняется работа, одобрен международным стандартом ТСО 92 и имеет характеристики, приведенные в таблице 14. Как видно из таблицы 15 параметры неионизирующих электромагнитных излучений монитора «Samsung» не превосходят предельных значений.

Таблица 7.1 – Допустимые значения параметров неионизирующих электромагнитных излучений

Наименование параметров	Допустимое значение
Напряженность электромагнитного поля по электрической составляющей на расстоянии 50 см вокруг монитора, В/м: в диапазоне от 5 Гц до 2 кГц в диапазоне от 2 кГц до 400 кГц	 25,0 2,5
Плотность магнитного потока, нТл в диапазоне от 5 Гц до 2 кГц в диапазоне от 2 кГц до 400 кГц	 250 25
Поверхностный электростатический потенциал, В	500

Таблица 7.2 – Значения параметров неионизирующих электромагнитных излучений монитора «Samsung»

Наименование параметров	Значение
Напряженность электромагнитного поля по электрической составляющей на расстоянии 50 см вокруг монитора, В/м: в диапазоне от 5 Гц до 2 кГц в диапазоне от 2 кГц до 400 кГц	 от 18 до 20 от 2,1 до 2,3
Плотность магнитного потока, нТл в диапазоне от 5 Гц до 2 кГц в диапазоне от 2 кГц до 400 кГц	 220 24

Поверхностный электростатический потенциал, В	400

Работа за монитором с низкой частотой смены кадров 56 – 60 Гц, что зрительно воспринимается как мерцание картинки монитора, вызывает повышенную утомляемость и головную боль.

Монитор, согласно СанПиН 2.2.2.542-96, должен обеспечить высокую и стабильную картинку. Для этого

частота смены кадров должна быть не менее 70 Гц. Другой важной характеристикой монитора является шаг точки изображения, который определяет расстояние между тремя физическими точками – красной, зеленой и синей, формирующими каждую логическую точку изображения. Мониторы с показателем 0,31 мм и более недопустимы в использовании, так как приводят к сильной утомляемости глаз оператора.

Монитор «Samsung» (по паспорту) имеет следующие характеристики, не превышающие требований СанПиН 2.2.2.542-96 [28]: - частота смены кадров от 70 до 85 Гц; - шаг точки изображения 0,27 мм.

Функции оператора при работе с дисплеем. При работе с дисплеем оператор ПЭВМ выполняет следующие функции:

- ввод информации с клавиатуры;
- предварительная обработка информации;
- текущие и тестовые расчеты;
- анализ выходной информации;
- необходимые корректировки.

7.2 Технические решения по обеспечению безопасности проведения экспериментов

В соответствии с ГОСТ 12.2.032 [29] высота рабочей поверхности должна быть от 0,7 до 0,8 м, высота сиденья от 0,4 до 0,5 м. Наиболее удобным для работы оператора является стол, имеющий выдвижную

столешницу для клавиатуры на высоте от 0,60 до 0,65 м, и основную столешницу на высоте от

0,75 до 0,80 м. Наиболее удобными являются сиденья, имеющие выемку, соответствующую форме бедер и наклон назад. Спинка стула имеет изогнутую форму, обнимающая поясницу, длина ее от 0,3 м, ширина 0,11 м, радиус изгиба от 0,30 до 0,35 м. Системный блок располагается с учетом зон досягаемости рук человека, монитор, располагается на расстоянии от 0,6 до 0,7 м от оператора в соответствии с условиями использования дисплеев, т.к. лучшее для оператора место находится на расстоянии, которое в 2,0 – 2,5 раза больше ширины экрана. Конструкция рабочего места [30] и взаимное расположение всех его элементов (сиденье, органы управления – клавиатура и манипулятор мышь, средства отображения информации – дисплей), соответствуют антропометрическим физиологическим требованиям и характеру работ. А именно, расположение элементов рабочего места в пределах зоны досягаемости моторного поля определяется в соответствии с их назначением и важностью в повседневной работе оператора. Например, дисплей, как часто используемое средство отображения информации, требующее точного и быстрого считывания, располагается в вертикальной плоскости под углом ±15 от нормальной линии взгляда.

Высота рабочей поверхности (стола) при категории работ оператора в вертикальной и горизонтальной плоскости согласно СанПиН 2.2.2.542-96 [28], составляет 0,725 м. Конструкцией рабочего места обеспечено выполнение операций в процессе работы в пределах зоны досягаемости моторного поля, обеспечено оптимальное положение работающего, которое достигается регулированием высоты рабочей поверхности, сиденья и пространства для ног, обеспечение расположения часто и редко используемых органов управления и средств отображения информации в соответствии с зонами досягаемости. Характер работ на данном рабочем месте, согласно СанПиН 2.2.2.542-96 [28], относится к группе Б – ввод данных с клавиатуры и В – творческая работа в режиме диалога с ПЭВМ.

Категория работ 3 – ввод информации до 60000 символов или продолжительностью до 6 часов.

В соответствии с характером работ рекомендуется устраивать перерывы общей продолжительностью до 70 минут в течение всего рабочего дня, переключаться на другие виды деятельности, выполнять серию легких физических упражнений несколько раз в час. Количество нажатий на клавишу необходимо ограничить до 12 тыс. в час (примерно 1700 слов). Вечернее освещение рабочего помещения желательно голубоватого цвета с яркостью, примерно равной яркости свечения экрана.

7.3 Производственная санитария помещения

Организация микроклимата.

Оптимальные микроклиматические условия – это сочетание параметров микроклимата, которые при длительном и систематическом воздействии на человека, обеспечивают сохранение нормального функционального и теплового состояния организма, создают ему ощущение комфорта и способствуют высокой работоспособности человека.

С целью создания нормальных условий труда для работающего рассматривают нормы микроклимата [31]. Эти нормы определяют оптимальные значения температуры, относительной влажности, абсолютной влажности и скорости движения воздуха (таблица 16).

Таблица 7.3 – Оптимальные параметры микроклимата во всех типах помещений с использованием ПК

Температура, 0 С	Относительная влажность, %	Абсолютная влажность, г/м^3	Скорость движения воздуха, м/с
19	62	10	менее 0,1
20	58	10	менее 0,1
21	55	10	менее 0,1

Параметры микроклимата в рассматриваемом помещении:

- температура воздуха 20-22 ^{0}С,
- относительная влажность воздуха 60-70 %,
- скорость движения воздуха не превышает 0,3 м/с.

В помещении применяется общеобменная вентиляция в сочетании с местной как искусственной, так и естественной. Естественная общеобменная вентиляция осуществляется через фрамуги в окнах и дверной проем. Местная вентиляция осуществляется при помощи небольших вентиляторов, встроенных в ПК. В помещении предусмотрена водяная система отопления, которая функционирует в раннее весеннее, в позднее осеннее время, а также в зимний период.

В данном помещении проводится ежедневная влажная уборка и систематическое проветривание после каждого часа работы на ПК.В целом параметры микроклимата, в данном помещении, находятся в пределах общеустановленных норм.

Освещение.

В помещении применяется одностороннее боковое естественное освещение, за счет одного окна размером $1{,}7 \cdot 1{,}4\ м^2$. В тех случаях, когда одного естественного освещения недостаточно, предусмотрено искусственное освещение. Для искусственного освещения помещения применяются люминесцентные лампы ЛБ–40. Они отличаются высокой световой отдачей, продолжительным сроком службы, малой яркостью светящейся поверхности, близким к естественному спектральному составу излучаемого света, что обеспечивает хорошую светопередачу. Для исключения засветки экрана дисплея световыми потоками оконные проемы снабжены светорассеивающими шторами. Согласно [31] должны

выполняться следующие требования к освещению на рабочих местах, оборудованных ПК:

- рабочие столы следует размещать таким образом, чтобы видеодисплейные терминалы были ориентированы боковой стороной к световым проемам, чтобы естественный свет падал преимущественно слева;

- искусственное освещение в помещениях для эксплуатации ПК должно осуществляться системой общего равномерного освещения. В помещениях, в случаях преимущественной работы с документами, следует применять системы комбинированного освещения (к общему освещению дополнительно устанавливаются светильники местного освещения, предназначенные для освещения зоны расположения документов);

- освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна быть в диапазоне от 300 до 500 лк. Освещение не должно создавать бликов на поверхности экрана. Освещенность поверхности экрана не должна быть более 300 лк;

- светильники местного освещения должны иметь непросвечивающий отражатель с защитным углом не менее 40 градусов;

- следует ограничивать неравномерность распределения яркости в поле зрения пользователя ПК, при этом соотношение яркости между рабочими поверхностями не должно превышать 3:1 – 5:1, а между рабочими поверхностями и поверхностями стен и оборудования 10:1;

- в качестве источников света при искусственном освещении следует применять преимущественно люминесцентные лампы типа ЛБ и компактные люминесцентные лампы (КЛЛ);

- $К_з$ - коэффициент запаса для осветительных установок общего освещения, $К_з = 1{,}4$;

- коэффициент пульсации не должен превышать 5 %;

- для обеспечения нормируемых значений освещенности в помещениях для использования ПК следует проводить чистку стекол оконных рам и светильников не реже двух раз в год и проводить своевременную замену

перегоревших ламп. Красноярск расположен в III поясе светового климата страны. Нормированное значение КЕО при боковом естественном освещении для III разряда зрительной работы равно 3 %. Предварительный расчет площади световых проемов производится по формуле (7.1):

$$100S_0/S_n = (E_{\text{н}} \cdot \text{К}_{\text{з}} \cdot \eta_0)/(\tau_0 \cdot r_1) \cdot \text{К}_{\text{зд}}, \quad (7.1)$$

где S_0 – площадь световых проемов при естественном боковом освещении;

S_n – площадь пола помещения;

$E_{\text{н}}$ – нормальное значение КЕО;

$\text{К}_{\text{з}}$ – коэффициент запаса для помещения, предназначенного для работы на ПК с учетом тонкой работы с печатной информацией, $\text{К}_{\text{з}} = 1{,}2$;

η_0 – световая характеристика окон;

$\text{К}_{\text{зд}}$ – коэффициент, учитывающий затенение окон противостоящими зданиями;

r_1 – коэффициент, учитывающий повышение КЕО при боковом освещении благодаря свету, отражаемому от поверхности помещения и подстилающего слоя, прилегающего к зданию;

τ_0 – общий коэффициент светопропускания, определяемый по формуле (7.2):

$$\tau_0 = \tau_1 \cdot \tau_2 \cdot \tau_3 \cdot \tau_4, \quad (7.2)$$

где τ_1 – коэффициент светопропускания материала, $\tau_1 = 0{,}8$;

τ_2 – коэффициент, определяющий потери света в несущих конструкциях, при боковом освещении, $\tau_3 = 1$;

τ_3 – коэффициент, учитывающий потери света в несущих конструкциях, при боковом освещении, $\tau_3 = 1$;

τ_4 - коэффициент, учитывающий потери света в солнцезащитных

устройствах, для убирающихся штор, $\tau_4 = 1$.

Площадь пола в помещении рассматриваемой комнаты равна 18 м^2, коэффициент $К_{зд} = 1$, так как напротив нет зданий, $\eta_0 = 31$, $r_1 = 2{,}9$. Из формулы (7.1) предварительного расчета площади световых проемов получаем необходимую площадь светового проема:

$$S_0 = (E_н \cdot К_з \cdot \eta_0 \cdot S_n \cdot К_{зд})/(\tau_0 \cdot r_1 \cdot 100), \quad (7.3)$$

$$S_0 = (3 \cdot 1{,}2 \cdot 31 \cdot 1 \cdot 18)/(0{,}52 \cdot 2{,}9 \cdot 100) = 13{,}32 \text{ м}^2.$$

Реальная площадь светового проема в комнате составляет 2,38 м^2. Для работы с ПК в помещении рассматриваемой комнаты необходимо применение совместного освещения.

Шум.

Шум мешает разговорной речи, негативно влияет на здоровье человека, может вызывать ухудшение слуха, воздействовать на центральную и вегетативную нервные системы, а через них на внутренние органы, приводя к значительным изменениям в функциональном состоянии организма. Все это приводит к значительному снижению производительности труда. На рабочем месте в рассматриваемом помещении имеет место шум, который создается техническими средствами, а также проникает извне. К техническим средствам, создающим шум можно отнести: вентилятор, встроенный в ПК, служащий для охлаждения компьютера; жесткий диск и клавиатуру. Согласно [32], шумовой характеристикой рабочих мест при постоянном шуме являются уровни звуковых давлений в децибелах в октавных полосах (таблица 7.4).

Совокупность таких уровней называется предельным спектром (ПС), номер которого численно равен уровню звукового давления в октавной полосе со

среднегеометрической частотой 1000 Гц.

Таблица 7.4 – Допустимые значения уровней звукового давления в октавных полосах частот и уровня звука, создаваемого ПК

Уровни звукового давления в октавных полосах со среднегеометрическими частотами									Уровни звука, дБА
31,5 Гц	63 Гц	25 Гц	250 Гц	500 Гц	1000 Гц	2000 Гц	4000 Гц	8000 Гц	
86 дБ	71 дБ	61 дБ	54 дБ	49 дБ	45 дБ	42 дБ	40 дБ	38 дБ	50

В рассматриваемом нами помещении используется современный ПК, создающий мало шума. На территории, прилежащей к зданию, нет источников сильных шумов. Можно сделать следующий вывод, что все показатели уровня шума на рабочем месте не превышают допустимые нормы.

7.4 Предупреждение аварий и взрывов

Электробезопасность

Требования, предъявляемые к электронному оборудованию, во многом зависят от помещения, в котором оно эксплуатируется. Согласно ПУЭ-86 помещение, в котором работает пользователь, относится к помещениям без повышенной опасности, для питания установки используется трехфазный четырехпроводной переменный ток напряжением (220/380) В, частотой 50 Гц, который подводится из электророзетки. Возможная причина поражения электрическим током – пробой фазы на токопроводящие элементы, повреждение шнуров. Для предотвращения этих случаев используются предохранители, защитные предохранители и заземление. В качестве заземления используется заземляющий контур здания, в котором размещается помещение лаборатории.

Для защиты от поражения электрическим током предусмотрено:

- недоступность токопроводящих частей от случайного прикосновения человека обеспечивается выбором соответствующей высоты подвеса линий электропередач, прокладкой кабельных линий в трубах, размещением в шкафах источников электроэнергии распределительных устройств, средств автоматики и включения, стационарным ограждением опасных электроустановок;

- возможность поражения при появлении напряжения в частях электрооборудования, осуществляется следующими мероприятиями: применено выравнивание потенциала, зануление, защитное отключение, в ПЭВМ защитное разделение сетей, использовать малые напряжения.

Персонал должен пройти инструктаж и обучение безопасным методам труда. Квалификация обслуживающего персонала не ниже II-ой квалификационной группы по технике безопасности. Должна проводиться периодическая проверка знаний и обучение безопасным методам труда.

Обеспечение взрывопожароопасной безопасности.

В соответствии [32] и учетом СНиП 21-01-97 [27], рабочее помещение оператора по категории пожарной опасности относится к категории «В». Проводниками пожара могут быть перегородки, двери, оконные рамы, полы, канцелярские принадлежности, изоляция силовых и сигнальных кабелей, обмотка радиотехнических деталей и т. д. Ввиду высокой стоимости ПК, горючести материалов, рабочие помещения проектируются 1 или 2 степени огнестойкости. При изготовлении строительных конструкций предусматривается использование не горючих и трудно сгораемых материалов: кирпича, железобетона, стекла, металла и другое. Для предотвращения распространения огня во время пожара с одной части здания на другую предусматривается устройство противопожарных преград. Для защиты от короткого замыкания применяются автоматические

предохранители и автоматы тепловой защиты в соответствии. Для предотвращения или/и ликвидации пожара применяются автоматические установки пожаротушения, углекислотные огнетушители, а также другие меры безопасности. Для вынужденной эвакуации людей из помещений предусматриваются эвакуационные пути. В целях предотвращения возникновения пожароопасной ситуации предусматривают следующие виды мероприятий:

- организационные (инструктаж персонала, разработка плана эвакуации и т.д.);
- технические (устройство не горючих перегородок);
- режимные (курение в специальных местах);
- эксплуатационные (профилактические осмотры).

Экологическая безопасность.

При работе в помещении и контроле за техническими процессами человек подвергается воздействию множества вредных веществ, поэтому необходимо учитывать их содержание в воздухе рабочей зоны.

Содержание вредных веществ не должно превышать предельно допустимых концентраций (ПДК). ПДК вредного вещества в воздухе рабочей зоны - гигиенический норматив для использования при проектировании производственных зданий, технологических процессов, оборудования, вентиляции, для контроля за качеством производственной среды и профилактики неблагоприятного воздействия на здоровье работающих. Наиболее вредные вещества представлены в таблице 7.5. Наряду с величинами ПДК указан класс опасности. По степени воздействия на организм человека вредные вещества подразделены на четыре класса опасности: 1 – вещества
чрезвычайно опасные, 2 – вещества высоко опасные, 3 – вещества умеренно опасные, 4 – вещества мало опасные, в соответствии с классификацией ГОСТ 12.1.007-76 [33].

Таблица 7.5 – Воздействие вредных веществ производственных помещений на окружающую среду

Наименование вещества	Класс опасности	Воздействие на окружающую среду	ПДК в рабочей зоне, мг/м^3
Пластмасса	4	Малоопасное	-
Резина	4	Малоопасное	-
Железо	3	Умереннноопасное	4
Магнитные поля	4	Малоопасное	-
Пыль	4	Малоопасное	6
Стекло	3	Умереннноопасное	5
Бумага	4	Малоопасное	2
Поролон	4	Малоопасное	-
Дерево	4	Малоопасное	-
Фенол	2	Опасное	3
Ацетон	4	Малоопасное	200
Углерода оксид	4	Малоопасное	20
Этилен	3	Умереннноопасное	100

Для снижения воздействия на организм человека вредных веществ необходимо уменьшить их концентрацию в рабочей зоне в соответствии с требованием [34] и [35] путем применения вентиляции, фильтров, кондиционеров, использования сертифицированного оборудования. В данной главе были рассмотрены неблагоприятные воздействия на здоровье и самочувствие расчетчика данной дипломной работы. Определив их, были предложены методы защиты или снижение влияния вредных факторов. Был определен оптимальный режим работы расчетчика, расположение рабочего места, определены микроклиматические условия помещения, где расположено рабочее место. Все это сделает работу оператора более комфортной и безопасной.

На основании вышесказанного можно сделать следующие выводы:

- Для обеспечения безопасности персонала, осуществляющего

выполнение задачи, поставленной в данной дипломной работе, были разработаны организационные, инженерно-технологические, лечебно-профилактические, санитарно-гигиенические меры, направленные на создание безопасных условий труда.

- При внедрении их в производство с соблюдением всех нормативных актов и систем ССБТ, охраны окружающей среды и ЧС, выполнение данных расчетов и научно-исследовательских операций можно считать относительно безопасным и экологичным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В итоге исследований, проведенных в данной работе, были получены следующие результаты:

1 Проведен анализ литературных источников, посвященных причинам разрушения и анализу напряженно-деформированного состояния в системе ТЗП ГТД.

2 Проведен эксперимент по высокотемпературному окислению образцов сплавов ЖС-26, ЖС-30, ЖС-32 и ЖС-36, проанализированы результаты.

3 Выбрана модель для расчета напряжений, вызванных ростом оксидного слоя и различиями в значениях КТЛР у слоев ТЗП. Методами сканирующей электронной микроскопии и энергодисперсионного анализа исследован образец лопатки ГТД, предоставленный НПО «Сатурн», на основании чего были получены исходные данные о геометрии исследуемой системы и произведен расчет напряжений, возникающих в системе ТЗП.

4 Произведено сравнение напряжений ТЗП, полученных при аналитическом расчете, с напряжениями, характерными для реальных систем ТЗП.

5 Выполнен расчет затрат на выполнение НИР.

6 Определены основные элементы, формирующие опасные и вредные производственные факторы в ходе исследования, дана их количественная оценка и технические решения по обеспечению безопасности НИР.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Chi, W. Thermal conductivity in ceramics / S. Sampath, H. Wing // Journal of the American Ceramic Society – 2008. – № 91 – С. 2636-2643.

2 Miller, R. A. Thermally induced spallation / R. A. Miller // Journal of the American Ceramic Society – 1984 – № 8 – С. 517-526.

3. Mumm, D. R On the role of imperfections in the failure of a thermal barrier coating made by electron beam deposition / D. R Mumm, A. G. Evans // Acta Mater – 2000 – № 48 – С. 1815–1817.

4 Smialek, J. L. A deterministic interfacial cyclic oxidation / J. L. Smialek // Acta Mater – 2003 – № 51 – С. 469-483.

5 Caliez, M. Numerical simulation of EBPVD thermal barrier coatings spallation / M. Caliez, J. L. Chaboche, F. Feyel, S. Kruch // Acta Mater – 2003 – № 51 – С. 1133–1141.

6 Aktaa, J. Assessment of TBC systems failure mechanisms using a fracture mechanics approach / J. Aktaa, K. Sfar, D. Munz // Acta Mater – 2005 – № 53 – С. 4399–4413.

7 Nijdam, T. J. Development of a pre-oxidation treatment to improve the adhesion between thermal barrier coatings and NiCoCrAlY bond coatings / T. J. Nijdam, G. H. Marijnissen, E. Vergeldt, A. B. Kloosterman, W. G. Sloof // Oxid Met – 2006 – № 66 – С. 269–294.

8 Guo, S.Q. Effect of interface roughness and coating thickness on interfacial shear mechanical properties of EB–PVD yttria-partially stabilized zirconia thermal barrier coating systems / S.Q. Guo, Y Tanaka, Y Kagawa, J Eur Ceram Soc – 2007 – № 27 – С.3425–3431.

9 Локай, В. И. Газовые турбины двигателей летательных аппаратов / В. И. Локай, М. К. Максутова, В. А. Стрункин. – М.: Машиностроение, 1979 – 279с.

10 Evans, A. G. Mechanics-based scaling laws for the durability of thermal barrier coatings / A. G. Evans, M. Y. He, J. W. Hutchinson // Progress in Materials Science – 2001 – № 46 – С.249-271.

11 Spitsberg, I. T. On the failure mechanisms of thermal barrier coatings with diffusion aluminide bond coatings / I.T. Spitsberg, A. G. Evans, D. R Mumm // Materials Science and Engineering – 2005 – № 394 – С.176-191.

12 Mao, W. G. Modeling of residual stresses variation with thermal cycling in thermal barrier coatings / W. G Mao, Y. C. Zhou, L. Yang, X. H. Yu // Mechanics of Materials – 2006 – № 38 – С.1118-1127.

13 Swetha, S. Photoluminescence Piezospectroscopy: A Multi-Purpose Quality Control and NDI Technique for Thermal Barrier Coatings / S. Swetha, M. Gell, S. Sridharan, M. Wen, E. H. Jordan // International Journal of Applied Ceramic Technology – 2004 – С. 322.

14 Sun, Y. Local stress evolution in thermal barrier coating system during isothermal growth of irregular oxide layer / Y. Sun, L. Jianguo, Z. Weixu, T. J. Wang // Surface & Coatings Technology – 2013 – №216 – С.237-250.

15 Кишкин, С. Т. Литейные жаропрочные сплавы : научно-технический сборник / С. Т. Кишкин. – Всерос. науч.-исслед. ин-т авиац. материалов, 2006. – 271 с.

16 Пат. 2446221 Российская Федерация, МПК C22C19/05. Литейный никелевый жаропрочный сплав / заявитель А.В. Логунов, М.Л. Кузменко, Ю.Н. Шмотин, С.А. Гришихин; патентообладатель ОАО «НПО «Сатурн». - №2010152295/02; заявл. 21.12.2010; опубл. 27.03.2012, Бюл. № 23. – 6 с

17 Evans, H. E. High temperature corrosion in nickel-based alloys / H.E. Evans, R. C. Lobb // Corrosion Science – 1984 – № 24 – С. 209-224.

18 Hille, T.S. Oxide growth evolution in thermal barrier coatings / T.S. Hille, S. Turteltaub, A. S. J. Suiker // Engineering Fracture Mechanics – 2011 – №78 – С. 2145-2150.

19 Hille, T.S. Damage growth triggered by interface irregularities in thermal barrier coatings / T.S. Hille, S. Turteltaub, A. S. J. Suiker // Acta Mater – 2009 – №57 – С. 2624–2630.

20 Zhou, Y.C. Coupled effects of temperature gradient and oxidation on thermal stress in thermal barrier coating system / T. Hashida // International journal of Solids and Structures – 2001 – №38 – С. 4235–4264.

21 Reddy, A. In site study of oxidation-induced growth strains in a model NiCrAlY bond-coat alloy / A. Reddy, D. B. Hovis, A. H. Heuer, A. P Paulikas, B. W. // Veal Oxidation of metals – 2007 – № 67 – С. 132-138.

22.Nychka, J.A. Surface oxide cracking associated with oxidation-induced grain boundary sliding in the underlying alloy / J. A. Nychka, C. Pullen, M. Y. He, D. R. Clarke // Acta materialia – 2004 – С. 1-9.

23 Tolpygo, V.K. Spalling failure of a-alumina films grown by oxidation / V.K. Tolpygo, D. R. Clarke // Materials Science and Engineering – 2000 – №278 – С. 151–161.

24 Канафодская, Л.И. Технико-экономические расчеты: метод. указ. к выполнению дипломных проектов научно-исследовательского характера для студентов инженерных специальностей / Л.И. Канафодская, Т.П. Лихачева: Красноясркий гос. техн. ун-т. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2001 – 46 с.

25 СанПиН 2.2.4.548-96 Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений – Госкомсанэпидемнадзор РФ, 1996.

26 НПБ 105-03 Определение категорий помещений, зданий и наружных установок по взрывопожарной и пожарной опасности – 2003 – 28 с.

27 СНиП 21-01-97. Пожарная безопасность зданий и сооружений.

28 СанПиН 2.2.2.542-96. Гигиенические требования к видеодисплейным терминалам персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы – Госкомэпидемнадзор РФ, 1996 – С. 376-407.

29 ГОСТ 12.2.032-78. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования – Издательство стандартов, 1979.

30 Бурлак, Г.И. Безопасность работы на компьютере – Наука, 1999 – 143 с.

31 СанПиН 2.2.2/2.4.134-03 Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организация работы.

32 Безопасность жизнедеятельности в техносфере: Учебное пособие / под ред. О.Н. Русака, В.Я. Кондрасенко – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2001 – 431 с.

33 ГОСТ 12.1.007-76. ССБТ. Вредные вещества. Классификация и общие требования безопасности – 1998.

34 ГОСТ 12.1.005-88 ССБТ Общие санитарно-гигиенические требования к воздуху рабочей зоны – 1998.

35 ГН 2.2.5.686-98 Предельно допустимые концентрации вредных веществ в воздухе рабочей зоны – Гигиенические нормативы, 1998.