

УДК 539.
Код ГРНТИ 30.19.27

doi 10.54708/19926502_2025_29110747

Макрофеноменологическое моделирование с целью поиска эффективной для эксплуатации зеренной структуры диска газотурбинного двигателя

К.А. Романов, Д.С. Грибов*, Н.С. Кондратьев, Д.С. Безверхий, А.И. Швейкин

ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», г. Пермь, Россия

Аннотация. В работе рассмотрен вопрос влияния среднего размера зерна на комплекс прочностных характеристик диска турбины газотурбинного двигателя из сплава Inconel 718. Для конструктивно-подобного элемента в условиях стационарного режима работы двигателя поставлена и решена начально-краевая задача по определению полей температуры, деформаций и напряжений. Примененная модель материала позволяет учесть зависимость усталостных свойств и предела пластичности материала от среднего размера зерна. Проведен ряд численных экспериментов, в которых задавалось градиентное и однородное распределение размера зерна по радиусу диска, проверено выполнение статического и кинематического усталостного критериев прочности для различных областей детали. Результаты численного моделирования показали, что градиентное распределение зерен по размеру – от 30 мкм вблизи ступицы до 50 мкм вблизи обода – в рассматриваемых условиях показывает лучшее сопротивление усталостной прочности и обеспечивает больший запас статической прочности по сравнению с однородным по конструкции средним размером зерна. Проведенный комплексный анализ показал устойчивость разработанной модели к возмущениям ключевых параметров воздействия (температуры) и состояния структуры (размера зерна).

Ключевые слова: диск газотурбинного двигателя; градиентные материалы; численное моделирование; прочность; сплав Inconel 718.

*gribovds@pstu.ru

Введение

Газотурбинные двигатели (ГТД) являются важной составной частью современной авиационной и промышленной техники. Детали ГТД эксплуатируются при очень больших рабочих температурах и напряжениях, что требует использования специальных материалов, обладающих высокой жаропрочностью и прочностью [1, 2]. К наиболее распространенным материалам, используемым при изготовлении ГТД, относятся сплавы на основе никеля, обладающие значительной стойкостью к высоким температурам, коррозии и окислению. Современные ГТД содержат большое количество деталей из сплавов на основе никеля (до 60 % по массе) [3–6]. Диски, лопатки, крепежные детали, корпуса и валы обычно изготавливаются из никелевых суперсплавов в связи с условиями их функционирования.

При термообработке жаропрочных сплавов может происходить изменение размера зерен матрицы, морфологии границы зерна, частиц упрочняющих фаз [5, 7, 8]. Регулируя эти процессы, можно добиться существенного повышения свойств в комплексе [9, 10]. Конечные характеристики сплавов зависят как от сформированной структуры, так и от химического состава. Цель термической обработки – обеспечить оптимальную для эксплуатации изделия зеренную структуру, совокупность количества и морфологии упрочняющих фаз в сплавах и, следовательно, благоприятное сочетание характеристик жаропрочности и пластичности [8, 11, 12]. Правильный выбор температуры обработки обеспечивает максимальное упрочнение никелевых сплавов за счет выделения γ' -фазы различной дисперсности, карбидов и боридов, а также создания зеренной структуры, наиболее подходящей для функционирования детали.

Анализ эксплуатации диска из жаропрочного никелевого сплава с различной зеренной структурой осуществлен на примере сплава Inconel 718 (наиболее близкий российский аналог – ХН45МВТЮБР). Этот сплав широко применяется при создании различных турбин ГТД благодаря своим уникальным свойствам [13, 14]. Также выбор сплава обусловлен большим количе-

ством информации в открытых источниках о его строении и свойствах. Его применение обусловлено уникальными механическими и физическими свойствами, которые делают его идеальным для работы в экстремальных условиях, характерных для ГТД. Сплав Inconel 718 используется в качестве материала лопаток компрессора и турбины, дисков и стенок горячей зоны, в компонентах камеры сгорания ГТД и других [13, 15]. Отметим, что реализованная в настоящей работе методика применима для решения задач моделирования и для других материалов и деталей аэрокосмической отрасли.

Реальные условия эксплуатации различных частей дисков ГТД существенно различаются для обода и ступичной части. Обод турбинного диска нагревается до более высоких температур, поскольку он расположен ближе к высокотемпературному газовому тракту, а в области ступицы наблюдаются более низкие температуры. При этом возникающие по сечению диска радиальные напряжения также существенно различаются: повышенные напряжения наблюдаются вблизи ступицы, в то время как вблизи обода напряжения минимальны. Согласно материаловедческим соображениям, мелкозернистая микроструктура обеспечивает наилучшие показатели предела текучести и усталостной прочности, а крупнозернистая микроструктура – лучшее сопротивление ползучести при высоких температурах. По этим причинам оптимальной структурой для диска ГТД является градиентная, а именно мелкозернистая вблизи ступицы и крупнозернистая вблизи обода [16–19]. Такое сочетание свойств нельзя получить с помощью традиционной термической обработки, так как стандартные режимы термообработки приводят к получению однородного размера зерна. Неоднородное по радиусу диска зерно возможно получить в результате проведения градиентной термической обработки, которая заключается в теплоизоляции и охлаждении центральной части диска и нагреве обода до температуры сольвуса фазы δ [20–22]. Рост зерен обеспечивается статической рекристаллизацией в результате предшествующей пластической деформации формования. При такой термической обработке формируется зеренная структура, обеспечивающая у центра диска меньший размер зерна, что позволяет повысить предел пластичности и высокую усталостную прочность. У обода диска за счет более крупнозернистой структуры получается достигнуть высокой жаропрочности, сопротивления ударной вязкости, сопротивления ползучести, зарождению и росту усталостных трещин.

Целью представленной работы являлось исследование влияния распределения среднего размера зерен по радиусу диска ГТД на прочностные характеристики, включая циклическую усталость и статическую прочность. Для решения этой проблемы была поставлена и решена краевая задача для описания функционирования диска в упрощенном полетном цикле. Для описания отклика был использован закон термоупругости, учитывающий релаксационную составляющую ползучести. Рассматривались различные распределения среднего размера зерна по радиусу диска. При описании статической и усталостной прочности были применены два критерия, учитывающие отношение действующих напряжений к пределу пластичности и накопленные деформации ползучести. С использованием конечно-элементного пакета проведены тестовые расчеты, а также сравнение распределений среднего размера зерна по радиусу и их влияние на выполнение двух критериев прочности.

1. Формулировка начально-краевой задачи для описания функционирования в условиях эксплуатации диска турбины двигателя

Объектом исследования является турбинный диск ГТД, на котором закреплены рабочие лопатки, позволяющие снимать мощность с потока газов, выходящего из камеры сгорания. Высокая угловая скорость создает поле центробежных сил, приводящее к растягивающим напряжениям в диске. Повышенные значения температуры на обode в условиях эксплуатации приводят к неупругим деформациям в результате ползучести. Важнейшим требованием, предъявляемым к турбинным дискам ГТД, является обеспечение их длительной работы в повторяющихся условиях повышенных температур и инерционных нагрузок, возможных дополнительных циклических нагружениях от вибрации.

Для улучшения прочностных характеристик турбинного диска предлагается определить градиент размера зерна по нему, который сможет обеспечить повышение предела текучести вблизи ступицы, где наблюдаются максимальные напряжения, с одновременным повышением сопротивления вязкому деформированию вблизи обода, где наблюдаются максимальные температуры. Для этого необходимо разработать математическую модель поведения турбинного диска в условиях эксплуатации, которая будет включать комплексный критерий разрушения, учитывающий статическую и усталостную прочность на основе принятия во внимание предела текучести и способности материала к ползучести, зависящих от размера зерна. Материал диска – Inconel 718 – жаропрочный никелевый сплав, широко используемый для создания деталей ГТД. Форма исследуемого объекта – симметричный относительно оси вращения диск со сложным профилем по толщине (имеет утолщения вблизи ступицы и обода), Рис. 1.

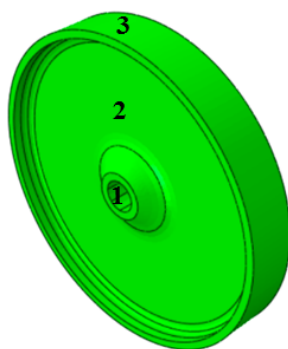


Рисунок 1. Форма исследуемого турбинного диска с указанием частей поверхности:
1 – ступица, 2 – полотно, 3 – обод.

Поверхности диска можно разделить по действующим на них нагрузкам (Рис. 1): на поверхности ступицы задается давление от посадки на вал, на ободу – поверхностные силы, имитирующие закрепление лопаток, полотно диска свободно от нагрузок. При моделировании процесса эксплуатации турбинного диска с использованием макрофеноменологической модели материала принимается ряд гипотез об условиях работы и свойствах материала:

1. Рассматривается стационарный режим функционирования диска, характеризуемый известной фиксированной угловой скоростью вращения и условно неизменными распределениями напряженного, деформированного и термического состояний во время полетного цикла.

2. Процесс работы диска описывается в подвижной системе отсчета с учетом сил инерции, при этом центробежные массовые силы могут быть определены как действующие по направлению от оси вращения, а модуль силы определяется удалением от оси вращения.

3. В ходе функционирования диска задаются условия первого рода для температур на ободу и ступице диска.

4. Можно пренебречь внутренними источниками тепла, связанными с диссипацией механической энергии.

5. Закрепление диска на вал описывается эффективно заданием однородного давления на поверхность ступицы.

6. Влияние лопаток на обод диска учитывается заданием поверхностных сил.

7. Для полотна диска (поверхности 2 на Рис. 1) задаются свободные границы.

8. Полная деформация диска на каждом цикле функционирования представляется суммой упругой, термической и неупругой за счет ползучести составляющих.

9. Для описания возможного разрушения диска применяется совокупность двух критериев прочности. Первый – усталостный критерий – позволяет учесть поврежденность материала за счет возможного накопления неупругих деформаций. Второй критерий – статический, и применяется для подтверждения того, что ни одна область детали не подвергается пластическому деформированию. При выполнении хотя бы одного критерия в локальной части диска принимается, что деталь выходит из строя.

С учетом сформулированных выше положений, моделирование функционирования диска на каждом из циклов может быть сведено к решению конкретизируемой далее задачи нестационарной термовязкоупругости. Пусть (r, θ, z) – вращающаяся с угловой скоростью диска цилиндрическая система координат, начало которой совмещено с его центром масс, а $\mathbf{I}_r$, $\mathbf{I}_\theta$ и $\mathbf{I}_z$ – поля нормированных координатных локальных базисных векторов, где $\mathbf{I}_z$ сонаправлен с осью вращения. Через D_0 обозначается отсчетная (ненагруженная) конфигурация материальных точек диска, представленная радиус-векторами их исходных позиций. Положение $\mathbf{r}$ точки $\mathbf{R}_0 \in D_0$ в искаженной конфигурации, соответствующей моменту времени t , определяется диффеоморфным отображением $\mathbf{r} = \mathbf{r}(\mathbf{R}_0, t)$, с которым ассоциируется соответствующая лагранжева система координат. В этой системе по умолчанию вводятся все поля (обладающие требуемой для корректной записи приводимых выражений гладкостью) вида $\mathbf{X} = \mathbf{X}(\mathbf{R}_0, t)$, задающие рассматриваемые характеристики материала диска в искаженной конфигурации, в том числе: Θ – температуры, Λ , M – упругих модулей Ламе, $\mathbf{u}$ – вектора смещений, Σ – тензора второго ранга напряжений Коши, $\mathbf{E}$, $\mathbf{E}_t$ и $\mathbf{E}_c$ – тензоров второго ранга полных (малых) деформаций, их аддитивных составляющих, характеризующих термическое расширение и ползучесть соответственно. На основе введенных определений постановка задачи была принята в следующем виде:

– уравнение движения в неинерциальной системе отсчета:

$$\ddot{\mathbf{u}} = \frac{1}{\rho} \nabla \cdot \Sigma + r\omega^2 \mathbf{I}_r; \quad (1)$$

изотропный закон Гука:

$$\Sigma = \Lambda \operatorname{tr}(\mathbf{E} - \mathbf{E}_c - \mathbf{E}_t) \mathbf{I} + 2M(\mathbf{E} - \mathbf{E}_c - \mathbf{E}_t); \quad (2)$$

– кинематические соотношения (набла оператор определен относительно фиксированной для наблюдателя пространственной системы координат):

$$\mathbf{E} = \frac{1}{2} (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T); \quad (3)$$

$$\mathbf{u} = \mathbf{r} - \mathbf{R}_0; \quad (4)$$

– соотношения линейного изотропного термического расширения:

$$\mathbf{E}_t = B(\Theta - \Theta_0) \mathbf{I}; \quad (5)$$

– соотношения ползучести:

$$\dot{\mathbf{E}}_c = A \exp\left(-\frac{Q_a}{k_B \Theta}\right) \left(\frac{\Sigma}{G}\right)^n; \quad (6)$$

– уравнение теплопроводности для изотропного закона Фурье:

$$\dot{\Theta} = \Delta \Theta; \quad (7)$$

– зависимость упругих модулей от температуры:

$$\Lambda = \Lambda(\Theta); \quad (8)$$

$$M = M(\Theta). \quad (9)$$

Здесь использованы обозначения: $\nabla = \mathbf{I}_r \partial / \partial r + r^{-1} \mathbf{I}_\theta \partial / \partial \theta + \mathbf{I}_z \partial / \partial z$ и $\Delta = \nabla \cdot \nabla$ – операторы Гамильтона и Лапласа для отсчетной конфигурации. Для диска принимаются известными: ω – угловая скорость вращения, ρ_0 и Θ_0 – плотность и температура материала в отсчетной конфигурации, $\Lambda(\Theta)$ и $M(\Theta)$ – его упругие модули Ламе при температуре, равной

Θ , B – коэффициент линейного термического расширения. В принятом макрофеноменологическом определяющем соотношении ползучести Q_a – энергия активации, k_B – константа Больцмана, n – параметр материала, A – параметр материала, зависящий от состояния его внутренней структуры. Предполагается, что на значение A влияет характерный размер $d(\mathbf{R}_0)$ кристаллического зерна в соответствующей материальной окрестности ($\mathbf{R}_0 \in D_0$):

$$A = A(d(\mathbf{R}_0)) = A_0 \left(\frac{b}{d(\mathbf{R}_0)} \right)^p, \quad (10)$$

где b – длина вектора Бюргерса, A_0 и p – постоянные параметры материала. Таким образом, критерий качества функционирования диска (с точки зрения прочностных свойств – возможного начала разрушения) определяется пространственным распределением d .

Начальные условия в задаче при $\mathbf{R}_0 \in D_0$ имеют вид:

$$\begin{aligned} \mathbf{u} &= \mathbf{0}, \quad t = 0, \\ \dot{\mathbf{u}} &= \mathbf{0}, \quad t = 0, \\ \Theta &= \Theta_0, \quad t = 0. \end{aligned} \quad (11)$$

При записи граничных условий поверхность ∂D_0 разбивается на попарно непересекающиеся области d_0^{ends} , d_0^{hub} и d_0^{rim} , соответствующие полотну (ends), ступице (hub) и ободу (rim) диска (Рис.2).

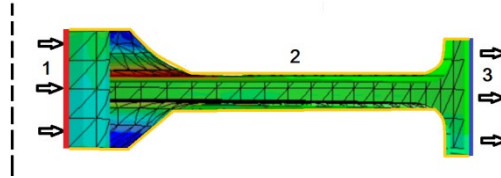


Рисунок 2. Схема разбиения поверхности диска для задания граничных условий:
1 (красный) – ступица, 2 (желтый) – полотно, 3 (синий) – обод.

На введенных областях для механической части задачи записываются следующие соотношения:

– смешанные условия на ступице, воспроизводящие заделку на вал:

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{l}_z \cdot \mathbf{u} &= 0, \\ \mathbf{l}_\theta \cdot \mathbf{u} &= 0, \\ \mathbf{l}_r \cdot \boldsymbol{\Sigma} \cdot \mathbf{l}_r &= \bar{p}^{\text{hub}}, \end{aligned} \right\} \mathbf{R}_0 \in d_0^{\text{hub}}, \quad (12)$$

где $\bar{p}^{\text{hub}} = \bar{p}^{\text{hub}*}$ – заданная нормальная компонента вектора напряжений (прижимающих вал к ступице диска);

– силовые условия на ободе, имитирующие работу лопаток в стационарном режиме:

$$\mathbf{l}_r \cdot \boldsymbol{\Sigma} = \bar{p}^{\text{rim}} \mathbf{l}_r, \quad \mathbf{R}_0 \in d_0^{\text{rim}}, \quad (13)$$

где $\bar{p}^{\text{rim}} = \bar{p}^{\text{rim}*}$ – величина заданного вектора напряжений (растягивающих диск со стороны обода);

– условия свободной поверхности для полотна:

$$\mathbf{n} \cdot \boldsymbol{\Sigma} = \mathbf{0}, \quad \mathbf{R}_0 \in d_0^{\text{ends}}. \quad (14)$$

Для термической составляющей задачи реализуются следующие граничные условия:

– заданная температура $\bar{\Theta}^{\text{rim}}$ на ободе диска (условия первого рода):

$$\Theta = \bar{\Theta}^{\text{rim}}, \mathbf{R}_0 \in d_0^{\text{rim}}; \quad (15)$$

– заданная температура $\bar{\Theta}^{\text{hub}}$ на ступице диска (условия первого рода):

$$\Theta = \bar{\Theta}^{\text{hub}}, \mathbf{R}_0 \in d_0^{\text{hub}}; \quad (16)$$

– отсутствие тепловых потоков на остальной части поверхности (тривиальные условия второго рода):

$$\mathbf{n} \cdot \nabla_0 \Theta = 0, \mathbf{R}_0 \in d_0^{\text{ends}}. \quad (17)$$

С применением представленной выше математической модели при решении краевой задачи проводятся расчеты и определяются изменяющиеся со временем поля напряжений $\Sigma(\mathbf{r}, t)$, неупругой деформации за счет ползучести $\mathbf{E}_c(\mathbf{r}, t)$ и температур $\Theta(\mathbf{r})$ в результате работы двигателя в течение одного периода T при стационарном режиме от взлета до посадки. Для найденных полей в следующем разделе формулируется феноменологический критерий усталостной прочности с применением гипотезы о линейном накоплении повреждений, в который явным образом входит число циклов N до разрушения. С применением этого критерия на найденных полях $\Sigma(\mathbf{r}, t)$, $\mathbf{E}_c(\mathbf{r}, t)$, $\Theta(\mathbf{r})$ можно определить наиболее критические точки диска $\mathbf{r}^*$ (как правило, это области локализации напряжений/деформаций), в которых происходит выполнение критерия при наименьших значениях N . Используемый способ описания циклических воздействий является упрощенным, в нем полагается эквивалентность всех учитываемых циклов, не рассматриваются нелинейные эффекты, проявляющиеся при нарастании числа циклов. Полученные результаты с применением данного подхода следует интерпретировать с учетом приведенного выше замечания и считать приближенными для прогнозирования малоциклового усталости. Для высоконагруженной части диска вблизи ступицы необходима оценка статической прочности. В связи с вышесказанным ниже вводятся два критерия прочности, рассматриваемые в комплексе.

2. Усталостный и статический критерии прочности

Далее приводятся применяемые критерии усталостной и статической прочности материала, которые позволяют оценить физическое время, или число циклов функционирования областей диска до момента разрушения материала в условиях термомеханических нагрузок. В качестве критерия для описания усталостной прочности предлагается применить кинематический критерий, основанный на накопленной деформации ползучести $\mathbf{E}_c$ [23]:

$$\sum_{j=1}^N \frac{p_{\text{cycle}}^{(j)}}{p_{\text{crit}}} = 1, \quad p_{\text{cycle}}^{(j)} = \left(\frac{2}{3} \mathbf{E}_c^{(j)} : \mathbf{E}_c^{(j)} \right)^{1/2}, \quad (18)$$

где p_{crit} – критическая величина интенсивности деформаций, при которой происходит разрушение, $p_{\text{cycle}}^{(j)}$ – интенсивность деформации ползучести на j -м цикле. В основу этого критерия положено описание образования, роста и коалесценции межзеренных полостей в ходе вязкого деформирования, описанного в экспериментальных исследованиях явления [24, 25]. Такое разрушение имеет преимущественно вязкий характер (транскристаллитное разрушение) и наблюдается при высокотемпературном деформировании в результате ползучести, приводящем к разрушению материала Inconel 718.

Статический критерий прочности применяется для проверки выполнения необходимого для пластического деформирования условия – достижения интенсивности напряжений предела текучести Σ_T . Критерий применяется для всех точек диска, при определении предела текучести учитывается закон Холла-Петча (явно рассматривается размер зерна):

$$\Sigma_T = \Sigma_0 + kd^{-1/2}, \quad (19)$$

где Σ_0 и k – параметры материала. Основой применения данного критерия является недопущение пластического деформирования при стационарном режиме работы, так как пластические деформации зачастую приводят к потере целостности детали.

3. Результаты моделирования работы газотурбинного диска

Поставленная в разделе 1 краевая задача была решена с применением МКЭ-пакета Abaqus [26]. В результате было определено изменяющееся со временем распределение температур, деформаций и напряжений в диске, вязкие деформации ползучести за один цикл функционирования (соответствующий двум часам постоянной нагрузки), применен критерий усталостной прочности, и определен запас прочности по статическому критерию. Для исследования была выбрана типовая для дисков ГТД упрощенная геометрия, представленная на Рис. 3. В ходе моделирования цикла работы двигателя определялись и анализировались следующие величины: поля напряжений, деформаций, выполнение критериев статической и усталостной прочности.

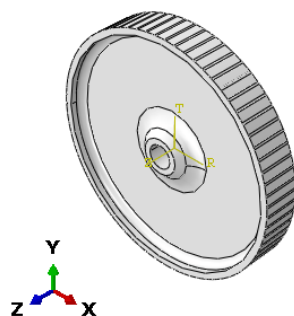


Рисунок 3. Геометрия диска.

На первом этапе была решена задача теплопроводности с заданными граничными условиями первого рода: на ступице 573 К, на ободе 873 К. Полученные поля установившихся температур представлены на рис. 4. Определенные в конечных элементах температуры были переданы для решения вязкоупругой задачи, граничные условия которой были следующие:

- величина нагрузки от лопаток – 200 МПа;
- внутреннее давление от посадки на вал – 26 МПа;
- вращательная нагрузка задается угловой скоростью в 2500 рад/с.

Рассматривался один цикл работы диска: время расчета – 7200 с, количество лопаток – 70, площадь в местах крепления лопаток – $5,39 \cdot 10^{-4}$ м², радиус диска – 0,10 м, размер зерна задан неоднородно: от 30 мкм до 50 мкм (линейное возрастание от ступицы к ободу). Максимальные интенсивности напряжений в диске, рассчитанные по Мизесу, достигли значений в 435 МПа вблизи его ступицы. Интенсивности напряжений на ободе достигли величины более 330 МПа, что может быть объяснено наличием постоянных внешних растягивающих сил, моделирующих действие лопаток (Рис. 5).

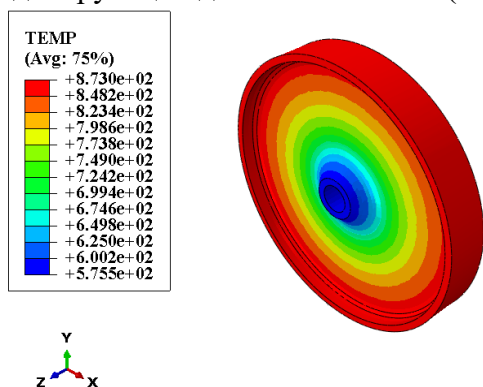


Рисунок 4. Поле установившихся температур, К.

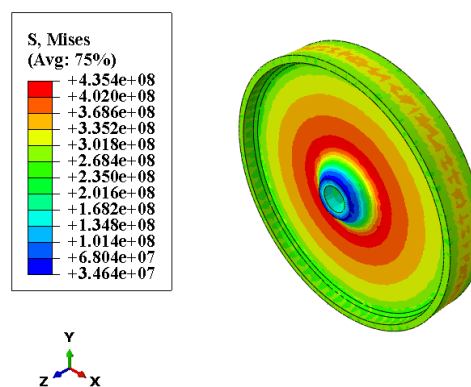


Рисунок 5. Поле интенсивности установившихся напряжений, Па.

На рисунке 6 представлено поле размера зерен в детали, для задания градиента зерна по радиусу было предписано линейно увеличивающееся зерно от 30 мкм до 50 мкм. Такое распределение позволяет достичь более высоких характеристик по статической и усталостной прочности: вблизи ступицы повышается предел текучести, вблизи обода – трещиностойкость и сопротивление вязкому деформированию, способного привести к разрушению.

Важную роль для анализа прочности играет определение неупругих деформаций, поле интенсивности которых приведено на Рис. 7. Можно отметить наибольшую интенсивность вязких деформаций вблизи обода, где наблюдаются максимальные температуры, и заданы локализованные силы, имитирующие закрепление лопаток.

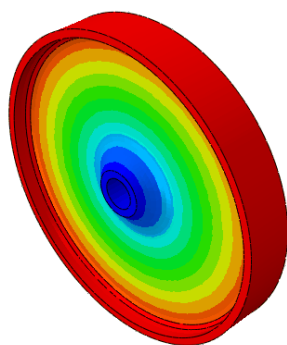
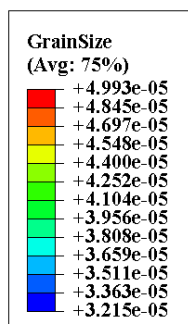


Рисунок 6. Распределение размера зерен по диску, м.

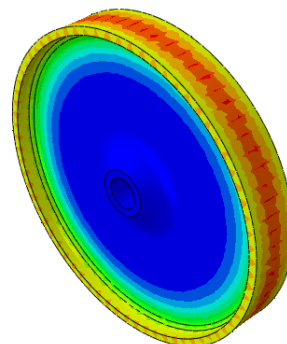
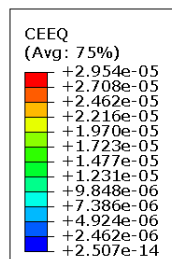


Рисунок 7. Поле интенсивности накопленных за один цикл вязких деформаций.

Для описания разрушения за счет накопления вязких деформаций был применен кинематический критерий (18), реализованный в пользовательской процедуре. Как можно видеть на Рис. 8, отношение интенсивности накопленной деформации ползучести к соответствующему максимальному критическому значению (0,8 %) составляет 0,37 % за один цикл. Таким образом, используя гипотезу о линейном накоплении поврежденности, можно оценить число циклов до разрушения. Полученные результаты и оценки качественно (по общему времени функционирования и количеству циклов работы) соответствуют [7, 25].

При проверке критерия статической прочности анализировалось отношение интенсивности напряжений к пределу текучести, поле данной величины изображено на Рис. 9. Можно отметить, что ни в одной точке не выполняется критерий пластичности, отношение интенсивности действующего напряжения к критическому значению не превышает 37 %, наибольшее отношение наблюдается вблизи ступицы – наиболее нагруженной части диска. Можно заключить, что критерий статической прочности выдерживается, причем имеется немалый запас по действующим напряжениям.

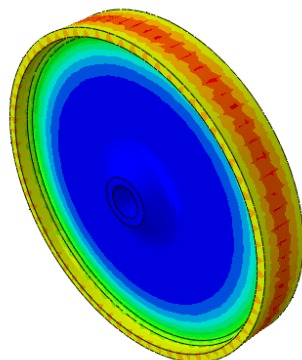
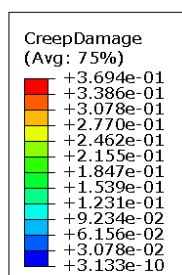


Рисунок 8. Поле отношения интенсивности накопленных деформаций ползучести к критическому значению за один цикл деформирования, %.

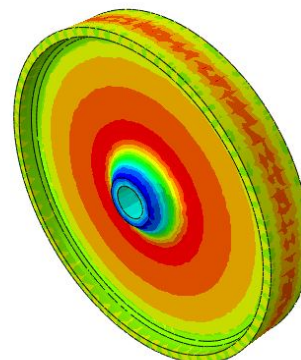
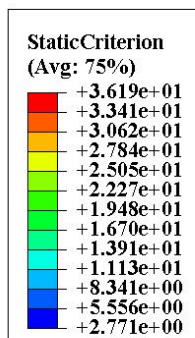


Рисунок 9. Поле отношения интенсивности действующих в точке напряжений к пределу текучести, %.

Для обоснования необходимости применения градиентного распределения размера зерна был проведен анализ результатов численных экспериментов в аналогичной постановке для дисков с однородным размером зерен. Были определены запас статической прочности и число циклов до разрушения, согласно приведенным на Рис. 10 и Рис. 11 критериям. Рассматривались диски с размером зерна 30 мкм и 50 мкм. Можно отметить, что диски с однородным размером зерна показали снижение как запаса статической прочности (на 4 % для зерен 50 мкм), так и снижение числа циклов до разрушения по кинематическому критерию.

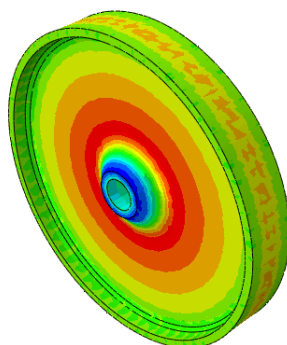
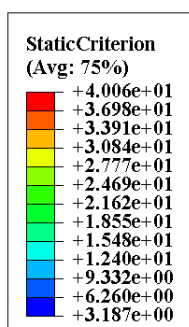


Рисунок 10. Поле отношения интенсивности действующих в точке напряжений к пределу текучести для однородного размера зерна 50 мкм, %.

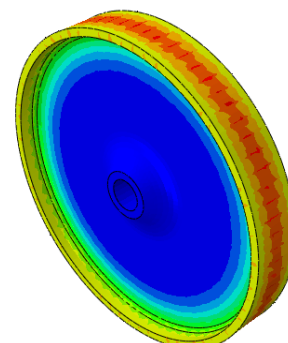
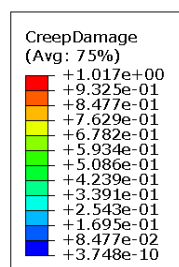


Рисунок 11. Поле отношения интенсивности накопленных деформаций ползучести к критическому значению за один цикл деформирования для однородного размера зерна 30 мкм, %.

4. Решение задачи об исследовании устойчивости модели к возмущениям параметров в малой подобласти диска ГТД

Одним из этапов оценки качества сложных нелинейных математических моделей, как представленная, является исследование устойчивости получаемых решений по отношению к возмущениям параметров (в широком смысле) модели [27].

Для частичного анализа устойчивости предлагаемой модели к возмущениям рассматривается деформирование малого объема, условно «вырезаемого» из диска ГТД и показанного на рисунке 12. Для этого применяется найденное решение сформулированной выше задачи

определения НДС и температуры диска в условиях эксплуатации. Эти поля передаются в качестве граничных условий при решении краевой задачи для вырезанного объема с целью описанного далее исследования на устойчивость. Детально описание этого способа моделирования приведено в [28].

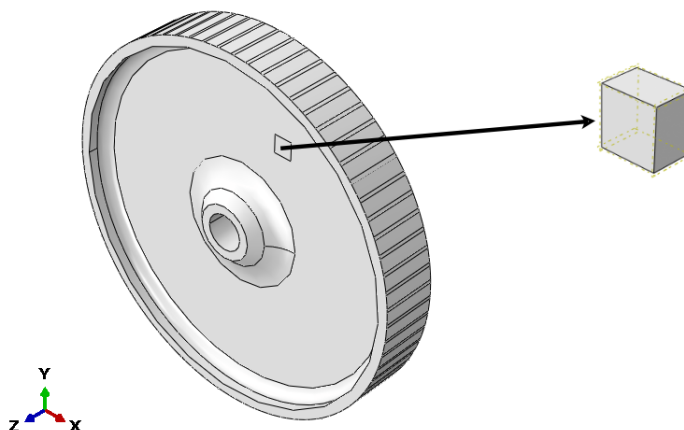


Рисунок 12. Диск ГТД с вырезанной малой подобластью.

Для комплексного исследования устойчивости конститутивных моделей используется методика, предложенная в работе авторов [27] и апробированная на исследовании устойчивости двухуровневых конститутивных моделей для описания неупругого деформирования ГЦК- и ГПУ-металлов [29, 30]. Отметим, что обозначенную методику можно применять для любого класса моделей, в том числе и для используемой макрофеноменологической. В рамках указанной процедуры оценки устойчивости моделей рассматриваются базовые решения – решения без возмущений, по отношению к которым исследуется устойчивость, и решения с возмущениями начальных условий, воздействий и параметрическими возмущениями оператора. При этом в ходе вычислений определяются относительные нормы отклонения отклика и изменения возмущаемых величин, по анализу которых делается вывод об устойчивости модели. Более подробно с общей процедурой численной реализации анализа устойчивости конститутивных моделей можно ознакомиться в работах [27, 29, 30].

В настоящей работе алгоритм реализации процедуры исследования устойчивости в малом объеме диска ГТД записывается следующим образом. Сначала с базовыми значениями параметров проводится расчет для целого объема диска. На основе полученного решения для всего диска определяются граничные условия на перемещения и температуру для анализируемой малой части диска. Проводится базовый расчет – решается краевая задача для вырезанной части диска, причем в нем учитывается, что исследуемая подобласть функционирует аналогично соответствующей области во всей конструкции диска через задание кинематических и температурных граничных условий. Затем для исследуемого малого объема проводится серия отдельных расчетов с возмущенными параметрами.

Рассматривалось возмущение двух ключевых параметров, характеризующих воздействия (температура Θ) и состояние структуры (размер зерна d). Выбор указанных параметров обусловлен тем, что точное их значение установить практически невозможно, при этом размер зерна является характеристикой мезоуровня (в модели на макроуровне рассматриваются осредненные значения) и оказывает влияние на получаемый отклик макроуровня за счет реализации ползучести. Температура также оказывает влияние на отклик макроуровня при ползучести и дополнительно влияет на значение упругих констант при решении краевой задачи. Таким образом, целесообразно проверить чувствительность модели к указанным параметрам.

Возмущение параметров осуществлялось в начальный момент деформирования, то есть значение возмущаемого параметра A^* будет определяться как $A^*(0) = A(0)(1 + \alpha)$, где A – значение параметра при базовом решении, α – случайная величина, равномерно распределенная

в диапазоне $[-\delta, \delta]$. В работе исследуется устойчивость модели к возмущениям параметров из диапазона их относительного изменения $\delta = 0.05$ при 50 вычислительных экспериментах. Откликом в данном случае будут являться компоненты тензора напряжений $\Sigma(t)$ для малого объема в ЛСК. Для проверки выполнения условий устойчивости [27] необходимо вычислить относительные нормы отклонения отклика и изменения параметров [27]:

$$\Delta_{\Sigma} = \frac{\|\Sigma^*(t) - \Sigma(t)\|}{\|\Sigma(t)\|}, \Delta_A = \frac{\|A^*(0) - A(0)\|}{\|A(0)\|}. \quad (20)$$

Полученные относительные нормы для каждого вычислительного эксперимента удобно отобразить на графике зависимости относительной нормы изменения отклика от относительной нормы отклонения параметров (Рис. 13).

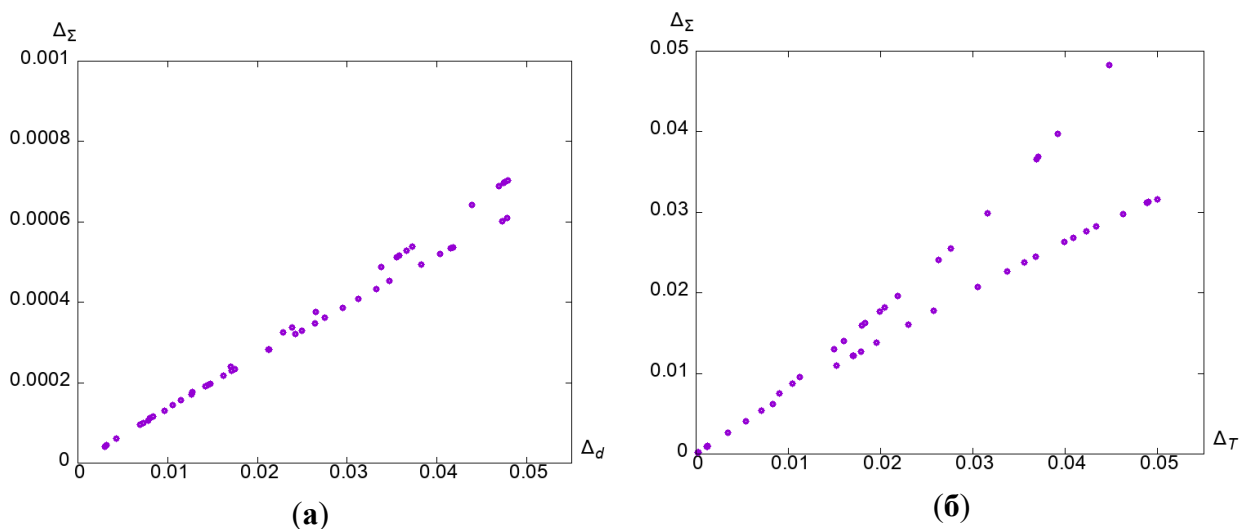


Рисунок 13. Зависимость относительной нормы изменения отклика от относительной нормы отклонения (а) размера зерна, (б) температуры.

По приведенным на рисунке 13 результатам можно сделать вывод об уменьшении относительной нормы отклонения отклика при уменьшении относительной нормы изменения параметров, что, согласно введенному определению [27], свидетельствует об устойчивости модели. Расхождение графиков на рисунке 13 объясняется тем, что при случайном возмущении параметров возможно их изменение в сторону увеличения и уменьшения – и при этом в модели получаются значения относительного отклонения отклика Δ_{Σ} , лежащие на верхнем или нижнем трендах. Также можно заметить, что относительное возмущение размера зерна оказывает менее существенное влияние на отклик, чем относительное изменение температуры. При этом примерно одинаковое относительное изменение температуры в большую или меньшую сторону вызывает более существенные относительные отклонения отклика.

Заключение

Разработана математическая модель для описания функционирования газотурбинного диска с однородным и градиентным распределениями размера зерна по радиусу. Поставлена и решена связанная температурная и механическая задача, определены изменяющиеся со временем поля температур, напряжений и деформаций в условиях полетного цикла. Примененное определяющее соотношение позволило описать ползучесть, существенно зависящую от температуры, напряженно-деформированного состояния и размера зерна в элементе.

Для анализа прочности применены кинематический критерий усталостной прочности и силовой критерий статической прочности. Сделаны оценки длительной прочности конструк-

ции с градиентным распределением зерна по радиусу диска. Численное моделирование эксплуатации диска ГТД подтвердило наличие наибольших напряжений вблизи ступицы, где наименьшие температуры, и наибольших температур при относительно невысоких напряжениях вблизи обода. Показано, что диск в рассматриваемых условиях может сопротивляться накоплению повреждений около 800 часов работы, а также наличие значительного запаса по статической прочности. Проиллюстрировано преимущество градиентного распределения зерна по радиусу по сравнению с однородным средним размером зерна, что выражается в снижении времени работы и запаса по статической прочности для последнего (и для мелкозеренной, и для крупнозеренной структур). Проведенный комплексный анализ показал устойчивость разработанной модели к возмущениям ключевых параметров воздействия (температуры) и состояния структуры (размера зерна).

Разработанная модель может быть применена в связке с многоуровневыми моделями, учитывающими влияние структуры и ее эволюцию на прочностные характеристики материалов [31]. В рамках исследования, изложенного в [32], показаны возможности многоуровневого моделирования для детального рассмотрения свойств областей конструкции с учетом явного описания состояния зеренной структуры. Представленная модель может быть применена для оптимизации массы диска, что является одной из важнейших целей проектирования деталей ГТД. Реализованный в работе аппарат применим для решения задач оптимизации структуры деталей авиакосмической и других отраслей промышленности.

Литература:

1. Братухин А.Г., Решетников Ю.Е., Иноземцев А.А. Основы создания газотурбинных двигателей для магистральных самолетов. М.: Авиатехинформ, 1999. – 271 с. [in Russian] Bratukhin A.G., Reshetnikov Yu.E., Inozemtsev A.A. Fundamentals of creating gas turbine engines for mainline aircraft. Moscow: Aviatekhinform, 1999. – 271 p.
2. Paulonis D.F., Schirra J.J. Alloy 718 at Pratt & Whitney: Historical Perspective and Future Challenges // Conference: Superalloys. – 2001. DOI: 10.7449/2001/Superalloys_2001_13_23
3. Каблов Е.Н., Оспенникова О.Г., Ломберг Б.С. Комплексная инновационная технология изотермической штамповки на воздухе в режиме сверхпластичности дисков из супержаропрочных сплавов // Авиационные материалы и технологии. 2012. – № 5. – С. 129–141. [in Russian] Kablov E.N., Ospennikova O.G., Lomberg B.S. Complex innovative technology of isothermal air stamping in the superplasticity mode of disks made of super-high-temperature alloys // Aviation Materials and Technologies. 2012. – No. 5. – pp. 129-141.
4. Chamanfar A. et al. Microstructural characteristics of forged and heat-treated Inconel-718 disks // Materials & Design. 2013. – Vol. 52. – P. 791–800.
5. Moiz M. The influence of grain size on the mechanical properties of Inconel 718. Sweden: Linköping University, 2013. – 126 p.
6. Pereira J.M., Lerch B.A. Effects of heat treatment on the ballistic impact properties of Inconel 718 for jet engine fan containment applications // International Journal of Impact Engineering. 2001. – Vol. 25. – P.715-733.
7. Saberi E. et al. Predicting stress and creep life in Inconel 718 blade-disk // Engineering Failure Analysis. 2020. – Vol.108. – P. 104226
8. Thomas A. et al. High temperature deformation of Inconel 718 //Journal of materials processing technology. 2006. –Vol. 177. – №. 1-3. – P. 469-472.
9. Каблов Е.Н. и др. Способ получения изделий из жаропрочных никелевых сплавов // Патент РФ № 2017125067, 13.07.2017. [in Russian] Kablov E.N. and others. The method for producing products from heat-resistant nickel alloys // Patent of the Russian Federation No. 2017125067, 07/13/2017.
10. Овсепян С.В. и др. Термическая обработка деформируемых жаропрочных никелевых сплавов для дисков ГТД // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер.: Машиностроение. 2011. – №2. – С. 122–130. [in Russian] Ovsepyan S.V. and others. Heat treatment of deformable heat-resistant

- nickel alloys for GTD discs // Bulletin of the Bauman Moscow State Technical University. Ser.: Mechanical Engineering. 2011. – No. 2. – pp. 122-130.
11. Zhu X. et al. Influence of grain size on the small fatigue crack initiation and propagation behaviors of a nickel-based superalloy at 650 °C // Journal of Materials Science & Technology. 2019. – Vol. 35, № 8. – P. 1607–1617.
12. Скибин В.А., Солонин В.И., Палкин В.А. Работы ведущих авиадвигателестроительных компаний по созданию перспективных авиационных двигателей. М.: ЦИАМ, 2004. 421 с. [in Russian] Skibin V.A., Solonin V.I., Palkin V.A. The work of leading aircraft engine companies to create promising aircraft engines. Moscow: CIAM, 2004. 421 p.
13. Evans R. M. The Welding and Brazing of Alloy 718. – Defense Metals Information Center, Battelle Memorial Institute, 1964. – T. 204.
14. Jeong D.-H. et al. Effect of service exposure on fatigue crack propagation of Inconel 718 turbine disc material at elevated temperatures // Materials Characterization. 2014. – Vol. 95. – P. 232–244.
15. Loria E.A. The status and prospects of alloy 718 // Jom. 1988. – Vol. 40. – P. 36-41.
16. Попович В.А. и др. Формирование заданных свойств функционально-градиентного сплава Inconel 718 с использованием аддитивных технологий // Металловедение и термическая обработка металлов. 2018. – № 11. – С.14-22 [in Russian] Popovich V.A. and others. Formation of specified properties of functional gradient Inconel 718 alloy using additive technologies // Metal science and heat treatment of metals. 2018. – No. 11. – pp.14-22
17. Gabb T.P., et al. Fatigue resistance of the grain size transition zone in a dual microstructure superalloy disk // International Journal of Fatigue. 2011. – Vol. 33. – P. 414-426.
18. Jiang R. et al. Fatigue crack propagation behavior of the grain size transition zone in a dual microstructure turbine disc // International Journal of Fatigue. 2023. – Vol. 172. –107647
19. Ломберг Б.С. и др. Взаимосвязь структуры и свойств высокожаропрочных никелевых сплавов для дисков газотурбинных двигателей // Авиационные материалы и технологии. 2011. – №2. – С.25-30. [in Russian] Lomborg B.S. and others. Interrelation of structure and properties of high-heat-resistant nickel alloys for disks of gas turbine engines // Aviation Materials and Technologies. 2011. – No. 2. – pp.25-30.
20. Gayda J., Gabb T.P., Kantzos P.T. The effect of dual microstructure heat treatment on an advanced nickel-base disk alloy // Superalloys 2004. – 2004. – P. 323-329.
21. Ганеев А.А. Влияние деформационно-термической обработки на формирование градиентной структуры и механических свойств в диске из гранульного никелевого сплава / А.А. Ганеев [и др.] // Физика металлов и металловедение. – 2019. – Т. 120. – №. 4. – С. 442-448. [in Russian] Ganeev A.A. Influence of deformation and heat treatment on the formation of gradient structure and mechanical properties in a disk made of granular nickel alloy / A.A. Ganeev [et al.] // Physics of metals and Metal Science. – 2019. – Vol. 120. – No. 4. – pp. 442-448.
22. Tao Y., Liu J.T., Zhang Y.W. Evaluation of mechanical properties of a superalloy disk with a dual microstructure // Advanced Materials Research. – 2011. – Vol. 278. – P. 381-386.
23. Li K. S. et al. A crystal plasticity-based approach for creep-fatigue life prediction and damage evaluation in a nickel-based superalloy //International Journal of Fatigue. 2021. – Vol. 143. – P. 106031.
24. Chen W., Chaturvedi M. C. The effect of grain boundary precipitates on the creep behavior of Inconel 718 //Materials Science and Engineering: A. 1994. – Vol. 183. – №. 1-2. – P. 81-89.
25. Wang Q. et al. Evolution of microstructural characteristics during creep behavior of Inconel 718 alloy // Materials Science and Engineering: A. 2022. – Vol. 857. – P. 143859.
26. Abaqus. Abaqus User Manual Dassault Systèmes, 2023.
27. Швейкин А.И., Трусов П.В., Романов К.А. Об одном подходе к численной оценке устойчивости многоуровневых конститутивных моделей материалов // Вычислительная механика сплошных сред. – 2021. – Т. 14, № 1. – С. 61–76. [in Russian] Shveykin A.I., Trusov P.V., Romanov K.A. An approach to numerical estimating the stability of multilevel constitutive models // Computational continuum mechanics. – 2021. – Vol. 14, No. 1. – pp. 61-76.

28. Baldin M., Kondratev N., Trusov P., Ostapovich K. Combined approach to solving applied metal forming problems // Crystals [in print].
29. Швейкин А.И., Трусов П.В., Романов К.А. Некоторые результаты численной оценки устойчивости двухуровневой конститутивной модели ГЦК-поликристалла // Вычислительная механика сплошных сред. – 2021. – Т. 14, № 2. – С. 127–143. [in Russian] Shveykin A.I., Trusov P.V., Romanov K.A. Some results of a numerical estimating of the stability of the FCC metal two-level constitutive model // Computational continuum mechanics. – 2021. – Vol. 14, No. 2. – pp. 127-143.
30. Shveykin A., Trusov P., Romanov K. Stability of Crystal Plasticity Constitutive Models: Observations in Numerical Studies and Analytical Justification // Metals. – 2024. – V. 14. – 947.
31. Трусов П. В., Швейкин А. И. Многоуровневые модели моно- и поликристаллических материалов: теория, алгоритмы, примеры применения. — Новосибирск: Издательство СО РАН, 2019. — 605 с. DOI: 10.15372/MULTILEVEL2019TPV [in Russian] Trusov P.V., Shveykin A.I. Multilevel models of mono- and polycrystalline materials: theory, algorithms, application examples. Novosibirsk: Publishing House of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 2019. 605 p. DOI: 10.15372/MULTILEVEL2019TPV
32. Кондратьев Н.С., Подседерцев А.Н., Шарифуллина Э.Р., Грибов Д.С., Швейкин А.И. Описание поведения диска из сплава Inconel 718 с использованием многоуровневой физически ориентированной конститутивной модели // Вестник УГАТУ. 2025. (подано в издательство). [in Russian] Kondratev N.S., Podsedertsev A.N., Sharifullina E.R., Gribov D.S., Shveykin A.I. The description of the behavior of a disk made of Inconel 718 alloy using a multilevel physically oriented constitutive model // Bulletin of UGATU. 2025. (submitted to the publisher).

Благодарности:

Решение задачи об исследовании устойчивости модели выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках реализации национального проекта «Наука и университеты» (в рамках выполнения государственного задания в лаборатории многоуровневого моделирования конструкционных и функциональных материалов, проект № FSNM-2024-0002).

Об авторах:

РОМАНОВ Кирилл Андреевич, м.н.с лаборатории «Многоуровневого моделирования конструкционных и функциональных материалов» ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», +7 (342) 2-391-297, k.a.kriv@mail.ru.

ГРИБОВ Дмитрий Сергеевич, к.ф.-м.н., н.с. лаборатории «Многоуровневого моделирования конструкционных и функциональных материалов» ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», +7 (342) 2-391-297, gribovds@pstu.ru.

КОНДРАТЬЕВ Никита Сергеевич, к.ф.-м.н., зав. лабораторией «Многоуровневого моделирования конструкционных и функциональных материалов» ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», +7 (342) 2-391-297, kondrat-evns@gmail.com.

БЕЗВЕРХИЙ Дмитрий Сергеевич, м.н.с лаборатории «Многоуровневого моделирования конструкционных и функциональных материалов» ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», +7 (342) 2-391-297, bezverkhyds@yandex.ru.

ШВЕЙКИН Алексей Игоревич, д.ф.-м.н., доц., в.н.с. лаборатории «Многоуровневого моделирования конструкционных и функциональных материалов», проректор по науке и инновациям ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», +7 (342) 2-391-297, shveykin@pstu.ru.

Metadata:

Title: Macrophenomenological modeling to determine an efficient grain structure for the gas turbine engine disk.

Author 1: Kirill Andreevich Romanov, Junior Researcher at the Laboratory of Multilevel Modeling of Structural and Functional Materials, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia, k.a.kriv@mail.ru, GVS-5919-2022, 57216282510.

Author 2: Dmitriy Sergeevich Gribov, Candidate of Physics and Mathematics, Researcher at the Laboratory of Multilevel Modeling of Structural and Functional Materials, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia, gribovds@pstu.ru, AAH-5893-2019, 56433341500.

Author 3: Nikita Sergeevich Kondratev, Candidate of Physics and Mathematics, Head of the Laboratory of Multilevel Modeling of Structural and Functional Materials, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia, kondratevns@gmail.com, U-1727-2017, 56433390400.

Author 4: Dmitriy Sergeevich Bezverkhy, Junior Researcher at the Laboratory of Multilevel Modeling of Structural and Functional Materials, Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia, bezverkhyds@yandex.ru, HNS-5059-2023, 58186779800.

Author 5: Alexey Igorevich Shveykin, Doctor of Physics and Mathematics, Assoc. Prof., Leading Researcher of the Laboratory of Multilevel Modeling of Structural and Functional Materials, Vice-Rector for Science and Innovations of the Perm National Research Polytechnic University, +7 (342) 2-391-297, shveykin@pstu.ru, A-8048-2016, 24765279800.

Abstract: The paper considers the issue of the influence of the average grain size on the complex of strength characteristics of the turbine disk of a gas turbine engine made of Inconel 718 alloy. For a structurally similar element in the conditions of stationary engine operation, the initial boundary value problem of determining temperature, strain and stress fields was posed and solved. The applied material model allows us to take into account the dependence of the fatigue properties and the plasticity limit of the material on the average grain size. A series of numerical experiments was carried out during which a gradient and uniform grain size distribution over the disk radius was set, and the fulfillment of static and kinematic fatigue strength criteria for various areas of the part was verified. The results of numerical modeling have shown that the gradient grain size distribution – from 30 microns near the hub to 50 microns near the rim – under the conditions shows better resistance to fatigue strength and provides a greater margin of static strength compared with the uniform design of the average grain size. The comprehensive analysis showed the stability of the developed model to perturbations of the key parameters of exposure (temperature) and the state of the structure (grain size).

Keywords: gas turbine engine disc; gradient materials; numerical modeling; strength; Inconel 718 alloy.