

7.02.06 (043)

~~1747~~

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
С С С Р

ЧЕЛЯБИНСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ  
имени ЛЕНИНСКОГО КСМСОМОЛА

На правах рукописи

Гохберг Владимир Элевич

МЕТОД ИССЛЕДОВАНИЯ НЕУПРУГОГО ЦИКЛИЧЕСКОГО  
ДЕФОРМИРОВАНИЯ КОНСТРУКЦИИ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРНОЙ  
МОДЕЛИ УПРУГО-ВЯЗКО-ПЛАСТИЧЕСКОЙ СРЕДЫ

Специальность 01.02.06. - "Динамика, прочность и надежность  
машин, приборов и аппаратуры"

А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Челябинск - 1977

Работа выполнена на кафедре "Сопротивления материалов" Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола.

Научный руководитель – доктор технических наук, профессор  
Гохфельд Д. А.

Официальные оппоненты – доктор технических наук, профессор  
Зарубин В. С.,  
кандидат технических наук, доцент  
Икрин В. А.

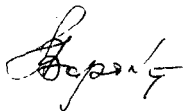
Ведущее предприятие – Центральный научно-исследовательский  
институт технологии машиностроения (г. Москва).

Защита состоится \_\_\_\_\_ 1977 г. на заседании  
Специализированного совета К 053-13-02 по присуждению ученой  
степени кандидата технических наук Челябинского политехнического  
института им. Ленинского комсомола.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке института  
Автореферат разослан \_\_\_\_\_ 1977 г.

Отзывы в двух экземплярах, заверенных печатью учреждения,  
просим направлять по адресу: г. Челябинск-44, проспект имени  
В. И. Ленина, 76, ЧИИ, ученому секретарю совета.

Ученый секретарь Совета  
кандидат технических наук, доцент



А. Варанкин

## Общая характеристика работы

Актуальность. Предусмотренное ХХУ съездом КПСС значительное улучшение качества, экономичности, производительности и надежности машин и аппаратов требует повышения скоростей, давления и температур рабочих процессов в машинах при одновременном стремлении к уменьшению их веса. В связи с этим все более актуальной становится проблема расчета на прочность и жесткость деталей, работающих в условиях упруго-пластического деформирования и высокотемпературной ползучести, с учетом особенностей эксплуатации и реальных свойств используемого материала. Надежный метод расчета кинетики неупругого деформирования элементов конструкций требуется для таких деталей, как лопатки и диски турбин, оболочки тепловыделяющих элементов ядерных реакторов, камеры сгорания двигателей, элементы теплообменных аппаратов и металлургического оборудования. В получивших распространение методах расчета пока еще не используются новые теоретические решения (модели среды), предложенные для описания упруго-вязко-пластического циклического деформирования материалов.

Ц е л ь. Разработка адекватного и доступного для применения в инженерной практике метода исследования кинетики неупругого деформирования элементов конструкций в условиях циклического воздействия механических нагрузок и температур, включающего а) методику математического моделирования свойств конкретного материала выбранной моделью среды и б) решение краевой задачи упруго-вязко-пластического деформирования на основе этой модели.

Метод исследования заключается в расчетно-теоретическом и экспериментальном обосновании предлагаемых в работе решений поставленных задач. В работе широко используются современные математические методы, включая методы оптимизации (математического программирования) и итерационные с реализацией расчетов на ЭВМ.

Научная новизна. Построен алгоритм получения параметров структурной модели упруго-вязко-пластической среды для отражения свойств циклически стабильных (стабилизирующихся) материалов, использующий оптимальный поиск по методу "деформируемого" многогранника. Определены параметры моделей стали Х18Н9Т для изотермических расчетов при температуре  $650^{\circ}\text{C}$ , сплава ЖС6К и стали 01765

для расчетов в диапазоне температур соответственно 20–1000°C и 20–800°C.

Разработан метод решения краевой задачи упруго-вязко-пластического деформирования элементов конструкций при использовании структурной математической модели, пригодный, в частности, для случаев, когда упругое решение данной задачи не может быть выражено в квадратурах.

В качестве иллюстрации метода выполнено решение задач о неупругом деформировании бруса малой кривизны с произвольным закреплением концов и тонкого осесимметричного диска в общем случае механического и теплового циклического нагружения.

Произведено детальное исследование кинетики деформирования двух важных элементов газовой турбины — диска и лопатки — в условиях характерных для транспортного газотурбинного двигателя режимов циклического неизотермического нагружения. Показана необходимость учета при оценке работоспособности этих деталей особенностей деформирования материалов, связанных с деформационной анизотропией вязких свойств и взаимным влиянием процессов длительного и быстрого неупругого нагружения.

Практическая ценность. Разработана методика получения параметров структурной модели среды для отражения свойств реальных материалов. Методика использует данные обычных испытаний моделируемого конкретного сплава, доступна для применения в инженерной практике и является перспективной не только для получения параметров рассмотренного варианта модели, но и для других реологических моделей среды.

Получены модели сплавов ЗИ765 и ЖС6К, которые могут быть использованы для расчетов неупругого деформирования элементов конструкций из них.

Предложен метод расчета кинетики неупругого деформирования элементов конструкций на основе структурной модели среды, который может быть использован для оценки работоспособности многих важных элементов конструкций энергомашиностроения, двигателестроения, металлургического оборудования, работающих в условиях упруго-вязко-пластического деформирования при повторно-переменном неизотермическом нагружении.

Разработаны методики расчета неупругого деформирования лопатки и диска газовой турбины, которые могут быть использованы при

решении таких важных вопросов, как определение режима оптимального вывода ГТД на полную нагрузку, определение программы ускоренных доводочных испытаний турбин, определение конструктивных мероприятий, обеспечивающих прочность и необходимую стабильность размеров лопаток и дисков при заданном ресурсе турбины. Выполнено исследование неупругого деформирования лопатки и диска конкретных ГТД в условиях характерного механического и теплового воздействия.

Результаты работы (включая соответствующие ЭВМ-программы) используются заинтересованными организациями.

Апробация. Основные положения работы докладывались на XI и XIII научных совещаниях по тепловым напряжениям в элементах конструкций (Канев, 1970, 1974), на научно-техническом совещании по проблемам прочности двигателей (Ленинград 1974); на III и IV научно-технических конференциях по конструкционной прочности двигателей (Куйбышев 1974, 1976), на научно-технических конференциях ЧПИ (1972 - 1976).

Публикации. Основные результаты выполненных исследований опубликованы в 6 работах

#### Содержание работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы и приложения. Она содержит 118 страниц основного текста, 4 таблицы, 61 рисунок, 96 наименований литературы.

Во введении кратко рассматриваются проблемы расчета упруго-вязко-пластического деформирования элементов конструкций, работающих в условиях циклического неизотермического нагружения, определяется необходимость в методе расчетного исследования кинетики неупругого деформирования конструкций на основе теории, позволяющей учитывать особенности поведения материалов в этих условиях.

В первой главе диссертации дан обзор существующих теорий предназначенных для описания неупругого деформирования элементов конструкций.

Применяемые в инженерной практике теории, достаточно хорошо отражающие поведение материалов при однократном нагружении, не позволяют описать особенности неупругого циклического деформирования, обнаруживаемые, в частности, при испытаниях с выдержками в условиях высокотемпературной ползучести. Наибольшую сложность представляет отражение деформационной анизотропии материалов и

взаимного влияния процессов длительного (ползучесть) и быстрого (пластичность) неупругого деформирования. Необходимость математического описания таких свойств вызвала в последнее время развитие теорий, использующих представление о дополнительных напряжениях, и, основанных на моделях среды, имитирующих ее микронеоднородность — физических и структурных моделях.

Первые из названных теорий основаны на разделении полного напряжения  $\sigma_{ij}$  на активное  $\alpha_{ij}$ , связанное с приростом пластических деформаций  $\beta_{ij}$  ассоциированным законом течения  $d\beta_{ij} = d\lambda \alpha_{ij}$ , и дополнительное  $m_{ij}$ , предназначенное для описания трансляции поверхности нагружения. Определяющим в этих теориях является закон связи дополнительного напряжения с другими параметрами процесса. Линейное деформационное упрочнение описывается при использовании простейшей связи  $m_{ij} = k \beta_{ij}$ , где  $k = \text{const}$  (А.Ю.Ишлинский, В.Прагер). Более общий закон упрочнения при однократном активном нагружении предложен Ю.Н.Кадашевичем и В.В.Новожиловы.  $m_{ij} = \psi(\beta) \beta_{ij}$ , где  $\psi$  — интенсивность пластической деформации.

При симметричном циклическом нагружении можно использовать соотношение Р.А.Арутюнян и А.А.Вакуленко  $dm_{ij} = \psi(\sigma) d\beta_{ij}$  ( $\sigma$  — интенсивность напряжения). Наиболее адекватные (но достаточно сложные) теории пластичности предложены Б.Ф.Норром и Н.Н.Малининым и Г.М.Хажинским  $dm_{ij} = \{k_1 + k_2 [m^* - \alpha^2 \alpha_{ij} (m_{ij} - k_1 \beta_{ij})] d\beta_{ij}$ , где  $k_1, k_2, m^*$  — константы материала. При произвольном ассиметричном циклическом нагружении, в отличие от других теорий, описывается асимптоти с —кая стабилизация диаграммы деформирования, приводящая к замкнутой петле. К недостатком этого варианта теории можно отнести независимость петли пластического гистерезиса после стабилизации диаграммы от предистории нагружения.

По аналогии с описанием анизотропного упрочнения в теории пластичности Н.Н.Малинин и Г.М.Хажинский предложили теорию ползучести, в которой используется представление о дополнительных напряжениях. Последние связаны здесь с вязкими деформациями

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \psi(\sigma) \Phi(\alpha) \alpha_{ij}; \quad dm_{ij} = A(\sigma) d\epsilon_{ij} - D(\sigma) \Phi(m) m_{ij} dt;$$

$$\alpha = \left(\frac{1}{2} \alpha_{ij} \alpha_{ij}\right)^{1/2}, \quad m = \left(\frac{1}{2} m_{ij} m_{ij}\right)^{1/2}.$$

Этот вариант теории, в отличие от технических теорий ползучести, позволяет качественно правильно описать изменение скорости ползучести после быстрой смены напряжения и анизотропное изменение скорости ползучести при циклическом нагружении.

Таким образом, использование представлений о дополнительных напряжениях оказалось достаточно плодотворным для независимого описания пластических (склерономных) и вязких (реономных) свойств материала. Для отражения наблюдаемого в экспериментах взаимовлияния двух видов неупругого деформирования делаются попытки связывать дополнительные напряжения одновременно с вязким и с мгновенным пластическим деформированием (Н.Н.Малинин и Г.М.Хажинский, А.Г. Угодчиков и Ю.Г.Коротких). Однако, с усложнением теорий, основанных на представлениях о дополнительных напряжениях, все более трудным и неясным становится вопрос о нахождении определяющих функции и параметров модели материала по экспериментальным данным о его свойствах (в литературе такая задача обычно не рассматривается), что препятствует использованию соответствующей теории в инженерной практике.

В последние десятилетия значительное внимание обращается исследователями на модели неоднородной среды — физические и структурные. Из этих моделей более простыми являются структурные, в соответствии с которыми элемент объема рассматривается как совокупность параллельно деформируемых подэлементов с отличающимися параметрами реологических свойств. Различные варианты структурной модели предложены в работах Г.Мазинга, Дж.Бесселинга, А.И.Ишлинского, Н.Н.Афанасьева, Ю.И.Кадашевича, В.В.Новожилова, С.Т.Милейко, В.С.Зарубина, М.А.Кузьмина, О.С.Садакова и др. Большой цикл работ, выполненный на кафедре сопротивления материалов ЧПИ, позволяет выделить в качестве наиболее пригодного для использования в инженерной практике вариант структурной модели, предложенный О.С. Садаковым и И.А.Ивановым.

С одной стороны, эта модель довольно проста (подэлементы наделены свойствами идеальной пластичности и установившейся ползучести) с другой стороны, она обладает большими возможностями сложных физических моделей в отражении особенностей неупругого циклического деформирования материалов при сложном напряженном состоянии в условиях неизотермического нагружения. Широкие экспериментальные исследования в различных условиях свидетельствуют о достаточно близком количественном описании этой структурной моделью наблюдаемых в экспериментах эффектов неуставившейся ползучести, взаимного влияния процессов быстрого неупругого нагруже-

ния и ползучести, влияние истории изменения температуры, особенностей непропорционального нагружения.

Практическое применение соответствующих уравнений для расчетов элементов конструкций вызывает необходимость в решении двух связанных проблем.

1. Решение задачи представления моделью свойств реального материала, т.е. определение объема необходимых экспериментальных данных о свойствах моделируемого материала и четкого алгоритма математической обработки этих данных для получения параметров модели.

2. Разработка метода решения краевой задачи неупругого деформирования элементов конструкций на основе данной модели.

В соответствии с принятым вариантом структурной модели с конечным числом подэлементов  $N$ , имеющих одинаковые полную деформацию  $\epsilon_{ij}$ , модуль упругости  $E$ , коэффициент теплового расширения  $\alpha$  и температуру  $T$ , полная деформация каждого подэлемента представляет собой сумму упругой  $r_{ij}^{(k)}$ , тепловой  $\alpha T$ , реономной (ползучесть)  $c_{ij}^{(k)}$  и лерономной (пластичность)  $\delta_{ij}^{(k)}$ . Напряжение связано с упругой деформацией законом Гука. Реономные свойства подэлементов определяются единой зависимостью скорости ползучести от напряжений и температуры  $\dot{\delta}_{ij}^{(k)} = (r_n^{(k)})^{-1} r_{ij}^{(k)} \Phi(\sigma_n^{(k)}/z_k, T)$ , где  $z_k$  - параметр разброса свойств подэлементов;  $\Phi$  - функция, совпадающая с зависимостью скорости установившейся ползучести моделируемого материала от напряжения и температуры; символами с индексом  $n$  обозначены интенсивности.

Склерономное деформирование подэлемента определяется законом идеальной пластичности при поверхности текучести Мизеса

$$d\delta_{ij}^{(k)} = dl^{(k)} r_{ij}^{(k)}; \quad dl^{(k)} = (r_n^{(k)})^{-2} r_{ij}^{(k)} (de_{ij} - dc_{ij}^{(k)}) \quad \text{при } r_n = r_n^{(k)} = \\ = \sigma_0 z_k (1 + \mu) E^{-1} \quad \text{и} \quad r_{ij}^{(k)} (de_{ij} - dc_{ij}^{(k)}) > 0, \quad \text{иначе } dl^{(k)} = 0.$$

Здесь  $e_{ij}$  - компоненты девиатора полной деформации;  $\sigma_0$  - предельное напряжение на диаграмме деформирования в интенсивностях, которое может быть достигнуто при быстром деформировании моделируемого материала.

Параметры состояния элемента объема  $\sigma, r, c, \delta$  находятся осреднением соответствующих величин в виде:  $\bar{x} = \sum_{k=1}^N x^{(k)} g_k$ , где  $g_k$  - "веса" подэлементов ( $\sum_{k=1}^N g_k = 1$ ).

Деформационные свойства материалов, отражаемые этими уравнениями, удобно рассмотреть с помощью модели из двух подэлементов,



для которых реологическая функция  $\Phi$  имеет простейший вид:

$\dot{\epsilon}^{(k)} = A^{(k)} \frac{\sigma^{(k)}}{Z_k}$ ,  $A^{(k)} = \text{Const}$ . Для такой модели в работе получены аналитические выражения, наглядно иллюстрирующие возможности структурной модели для качественно правильного отражения известных особенностей повторно-переменного деформирования, в том числе таких, как эффект Гаушингера, ускорение ползучести после неупругого деформирования обратного по отношению к этой ползучести направления, изменение диаграмм деформирования материала после предварительного вязкого деформирования, появление при ступенчатом изменении нагрузки неустановившейся ползучести со скоростью, зависящей от предистории нагружения и последующий выход на участок установившейся ползучести в случае выдержки при фиксированных напряжениях и температуре.

Во второй главе предлагается методика решения задачи представления моделью свойств реального материала. Решение этой задачи заключается в определении реологической функции  $\Phi$  и параметров  $Z_k$ ,  $q_k$ .

Реологическая функция  $\Phi$ , или зависимость скорости установившейся ползучести моделируемого материала от напряжения и температуры определяется из обычных испытаний на ползучесть. Программа нагружения составляется таким образом, чтобы максимально сократить длительность испытания и накапливаемую до выхода на участок установившейся ползучести необратимую деформацию. Более сложным является определение параметров  $q_k$ ,  $Z_k$ . Авторы модели развили для этого известный способ Н.Н.Афанасьева, использующий дифференцирование диаграммы деформирования моделируемого материала. Однако этот метод для модели с конечным числом подэлементов довольно трудоемок и часто приводит к неудовлетворительным результатам. В диссертации параметры  $q_k$ ,  $Z_k$  предлагается определять следующим образом.

Диаграмма деформирования при фиксированной температуре аппроксимируется ломаной линией. Число звеньев этой ломаной, необходимое для достаточно подробного описания рассматриваемой кривой деформирования материала, определяет количество подэлементов модели  $N$ . По известным значениям напряжений  $\sigma_k$  и деформаций  $\epsilon_k$  в узлах полигональной диаграммы деформирования находятся значения параметров  $q_k$  и  $Z_k$  первого приближения:

$$g_k = \frac{1+\mu}{E} \left[ \frac{\sigma_k - \sigma_{k-1}}{\varepsilon_k - \varepsilon_{k-1}} - \frac{\sigma_{k+1} - \sigma_k}{\varepsilon_{k+1} - \varepsilon_k} \right], \quad k = 1, 2, \dots, N-1; \quad (1)$$

$$g_N = 1 - \sum_{k=1}^{N-1} g_k;$$

$$z_k = \frac{E}{1+\mu} \frac{\varepsilon_k}{\sigma_k}, \quad k = 1, 2, \dots, N-1; \quad z_N = \left( 1 - \sum_{k=1}^{N-1} z_k g_k \right) g_N^{-1}. \quad (2)$$

Естественно, что в общем случае диаграмма деформирования модели с этими параметрами не будет совпадать с исходной диаграммой материала, так как при определении  $g_k, z_k$  по формулам (1), (2) не учитывается ползучесть. Для уточнения  $g_k$  и  $z_k$  предлагается использовать процедуру оптимального поиска по методу "деформируемого" многогранника. В соответствии с этим методом в пространстве искомых параметров рассматривается многогранник, каждой вершине которого отвечает вариант структурной модели с конкретным набором значений параметров и значение функции ошибки  $F$ . Последняя конструируется для отражения количественного несоответствия деформирования модели с данным набором параметров и моделируемого материала. Процесс поиска осуществляется в результате организации движения многогранника в сторону минимума функции путем последовательной замены вершин с большим значением ошибки на новые вершины с меньшим ее значением (на каждом шаге отбрасывается вершина с максимальным значением  $F$ ). При этом многогранник изменяется в размерах и по форме. В качестве исходного набора значений параметров модели для построения начального многогранника используются параметры  $g_k, z_k$ , найденные по формулам (1), (2).

При определении параметров для новой температуры удобно "веса" сохранять прежними. При этом варьируемыми в процессе оптимального поиска являются только параметры  $z_k$ . По найденным для каждой температуры значениям  $z_k$  строятся зависимости  $z_k(\tau)$ .

Возможности использования методики получения параметров модели показаны в работе на примере определения параметров модели стали X18H9T при температуре 650°C. Испытания проводились на установке для кручения образцов, созданной на кафедре сопротивления материалов ЧИМ. Определение параметров выполнено на ЭВМ ЕС 1020. Для оценки адекватности модели моделируемому материалу оказалось удобным использовать функцию

$$F = \frac{1}{8 \sigma_{\max}^2 \varepsilon_{\max}} \int_0^{\varepsilon_{\max}} [\sigma(\varepsilon) - \sigma_M(\varepsilon)]^2 d\varepsilon, \quad (3)$$

где  $\sigma(\varepsilon) - \sigma_M(\varepsilon)$  - разность между экспериментальными и расчетными напряжениями при деформации  $\varepsilon$  (имеется подпрограмма расче-

та кинетики деформирования структурной модели);  $\sigma_{\max}$ ,  $\epsilon_{\max}$  — максимальные напряжения и деформация на диаграмме деформирования образца. Полученная модель ( $N = 16$ ) достаточно точно описывает диаграммы деформирования и кривые ползучести стали X18H9T при различных программах циклического нагружения. Например, погрешность описания циклической диаграммы деформирования, определяемая по формуле (3), равна  $0,6 \cdot 10^{-3}$  (для сравнения: соответствующая погрешность в случае модели, параметры которой получены графическим методом, использующим дифференцирование диаграммы деформирования моделируемого материала, равна 0,19).

Третья глава посвящена разработке метода решения задачи о кинетике неупругого деформирования элементов конструкций на основе структурной модели среды. Показаны пути реализации метода на ЭВМ и возможность использования ЭВМ — программы для некоторых теоретических исследований, с целью облегчения применения метода в инженерной практике приведены решения для частных видов напряженного состояния — одноосного и плоского — с решениями соответствующих других задач в замкнутом виде и последовательными приближениями.

Для определения истории изменения напряжений и деформаций в конструкции в процессе нагружения (расчета кинетики деформирования) используются обычные уравнения равновесия и совместности и физические зависимости, определяемые структурной моделью среды. Расчет заключается в определении параметров состояния конструкции в выделенные последовательные моменты времени  $t_i (i=0,1,2, \dots)$ ; значения параметров внешнего воздействия в эти моменты считаются заданными.

В общем случае эта задача решается последовательными приближениями.

По заданному состоянию в элементах конструкции и подэлементах модели и температуре на начало интервала  $\Delta t = t_{i+1} - t_i$  определяется скорость вязкой деформации подэлементов  $\dot{\epsilon}_{ij}^{(k)}(t_i)$  и соответствующий прирост деформации ползучести  $\Delta \epsilon_{ij}^{(k)}$  (считается, что скорость  $\dot{\epsilon}_{ij}^{(k)}(t_i)$  в течение малого времени  $\Delta t$  остается постоянной). Этот прирост во всех итерациях неизменен. Затем по найденному в предшествующей итерации значению полной деформации в соответствии с ассоциированным законом течения вычисляются приросты склерономной деформации в подэлементах  $\Delta \epsilon_{ij}^{(k)}$  за интервал (в первом приближении принимается  $\Delta \epsilon_{ij}^{(k)} = 0$ ). При этом предпола-

гается, что в каждой итерации полные деформации  $\epsilon = \epsilon^{(k)}$  определены правильно и интенсивность прироста мгновенной пластической деформации в подэлементе  $\Delta_i b^{(k)}$  есть превышение деформации  $\epsilon$  над суммой деформаций: предельной  $r_s^{(k)}$ , необратимой в момент времени  $t_k$  ( $p^{(k)}(t_k)$ ) и прироста реономной деформации  $\Delta_i c^{(k)}$ . Сумма полученного значения  $\Delta_i b_{ij}^{(k)}$  и прироста вязкой деформации  $\Delta_i c_{ij}^{(k)}$  с необратимой деформацией в момент времени  $t_k$  дает поле необратимой деформации в момент  $t_{k+1}$  ( $p_{ij}^{(k)}(t_{k+1})$ ). Осреднением этого поля определяется соответствующее поле необратимой деформации  $p_{ij}(t_{k+1})$  в точках конструкции. Далее решается обычная задача термоупругости при заданном поле дополнительных деформаций  $p_{ij}(t_{k+1})$  и заданном внешнем воздействии. В результате находятся напряжения и полная деформация в точках конструкции в момент  $t_{k+1}$ . Последняя используется в следующей итерации для нахождения нового значения  $\Delta_i b_{ij}^{(k)}$ . Расчет состояния конструкции на конец интервала (расчет интервала) заканчивается при удовлетворительном совпадении значений приростов пластической деформации в соседних приближениях.

Описанный алгоритм не накладывает ограничения на способ решения "упругой" задачи. Чаще всего она не решается в квадратурах. Удобным оказалось "упругое" решение также производить последовательными приближениями, объединяя итерации для решения "упругой" задачи с итерациями для определения приростов пластической деформации. При этом на каждом интервале в качестве первого приближения при решении "упругой" задачи используются значения параметров состояния, соответствующие началу интервала.

В связи с тем, что общая задача расчета кинетики деформирования решается малыми "шагами", процесс расчета интервала осуществляется достаточно быстро. Расчет интервала заканчивается по достижении малой разницы одновременно между значениями упругих деформаций и приростов пластических деформаций в соседних итерациях.

Практическое использование разработанного метода расчета кинетики неупругого деформирования элементов конструкции показано на двух примерах.

Для неравномерно нагретого бруса малой кривизны с произвольным закреплением концов, находящегося под воздействием распределенной по длине нагрузки (моменты и силы) выполнено "упругое" ре-

шение в квадратурах. На основе этого решения показан алгоритм расчета кинетики деформирования рабочей и сопловой лопатки газовой турбины, получены формулы для определения перемещения периферийного сечения рабочей лопатки турбины в поле центробежных сил при неравномерном по объему лопатки нагреве.

Уравнения структурной модели среды для случая плоского напряженного состояния используются при решении задачи неупругого деформирования вращающегося тонкого диска. В основу "упругого" решения положен метод последовательных приближений, разработанный Р.С. Кинашошвили.

Важной особенностью ЭВМ-программы расчета элементов конструкций на основе изложенного метода является возможность ее использования для расчетов по известным феноменологическим теориям пластичности и ползучести, тем самым возможность достаточно сложного расчетного сопоставления теорий и определения области их применения. Такая особенность заложена в самой структурной модели. При задании частных вариантов модели можно выполнить решения по теории течения Прандтля - Рейса (один идеально-пластический подэлемент), теории течения с линейным упрочнением и идеальным эффектом Баушингера (два идеально-пластических подэлемента), теории течения с линейным трансляционным упрочнением, теории ползучести в формулировке Ю.Н. Работнова, техническим теориям ползучести; провести расчет вязко-пластического деформирования элемента конструкции с простым суммированием неупругих деформаций обоих видов.

В четвертой главе выполнено исследование кинетики неупругого деформирования двух важных элементов газовой турбины - лопатки и диска рабочего колеса - в характерных для транспортного ТД условиях циклического нагружения. По результатам исследования сделан анализ прочностной работоспособности этих деталей.

В цикле нагружения лопатки имитировались режим запуска, отличающийся быстрым разогревом лопатки с резкой неравномерностью температур по сечению (при этом рост центробежной нагрузки идет несколько медленнее) и следующий за ним стационарный режим при умеренном тепловыделении.

Структурная модель лопаточного сплава ДС6К получена в результате обработки достаточно подробных справочных данных (кривые деформирования и ползучести) в диапазоне температур 20 - 1600°C.

Расчет лопатки выполнен на ЭВМ Минск 32. Параметры нагруже-

ния лопатки были таковы, что возникающие напряжения оказались ниже предела текучести материала и происходило только вязкое деформирование (ползучесть). Вследствие несинхронности изменения значений теплоперепада по сечению и оборотов в процессе нагружения в кромках лопатки чередовались напряжения растяжения и сжатия. Расчет (как и аналогичные испытания образцов) показывает, что после каждой смены знака напряжения последующая ползучесть начинается с участка неустановившейся ползучести с мгновенными значениями скоростей, большими соответствующих скоростей ползучести при отсутствии вязкого деформирования обратного направления. Это приводит к интенсивному знакопеременному вязкому деформированию в каждом цикле и сохранению значительной ширины петли деформации ползучести в циклах после некоторой стабилизации (рис. 1,  $\delta c$  — ширина петли деформации ползучести в точках выходной кромки,  $\epsilon_0$  — остаточная деформация в точках центральной части сечения).

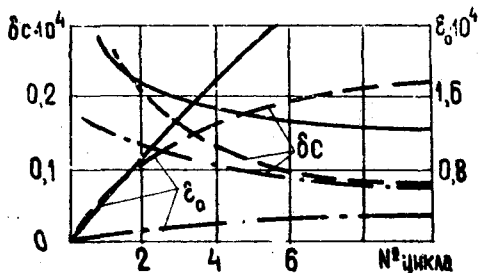


Рис.1

Для сравнения на рис. 1 штриховой линией показаны соответствующие результаты расчетов по теории ползучести упрочнения, а штрих-пунктирной линией — по теории установившейся ползучести. Определяющая малоцикловую усталость ширина петли необратимой деформации за стабиль-

ный цикл по этим теориям занижена примерно в два раза. Знакопеременное вязкое деформирование сопровождается в рассматриваемой лопатке односторонним накоплением необратимой деформации  $\epsilon_0$  со скоростью 0,04% за цикл, которое рассмотренными техническими теориями ползучести занижено почти на порядок.

В качестве примера практического использования метода расчета в случае, когда "упругая" задача не решается в квадратурах, выполнено исследование кинетики упруго-вязко-пластического деформирования диска турбины из стали 3М765. Параметры модели этой стали ( $N=5$ ):

$$Z_1 = 0,68; \quad Z_2 = 0,89; \quad Z_3 = 1,04; \quad Z_4 = 2,22; \quad Z_5 = 13,8;$$

$$g_1 = 0,783; \quad g_2 = 0,126; \quad g_3 = 0,049; \quad g_4 = 0,0245; \quad g_5 = 0,0175;$$

$$E, \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2} = 22900 - 7,0 (T^\circ\text{C} - 20);$$

$$\alpha, \text{град}^{-1} = 0,116 \cdot 10^{-4} + 0,55 \cdot 10^{-8} (T^\circ\text{C} - 20);$$

$$\sigma_{\text{в}}, \frac{\text{кг}}{\text{мм}^2} = 90,0 - 0,026 (T^\circ\text{C} - 20);$$

$$\dot{\epsilon}^{(k)}, \text{ч}^{-1} = \exp \left\{ 213 - \frac{254000}{T^\circ\text{C} + 273} + [73,3 - 0,063(T^\circ\text{C} + 273)] \ln \left( \frac{\sigma^{(k)}}{Z_k} \right) \right\}$$

( $\sigma^{(k)}$  — интенсивность напряжения в  $k$ -ом подэлементе;  $k=1,2,\dots,N$ ).

Цикл нагружения диска включал этап, имитирующий нестационарный режим (типа пуск-остечов) и следующий за ним этап стационарного нагружения. Анализ полученных результатов расчета свидетельствует о том, что с каждым циклом в диске накапливается деформация растяжения, особенно интенсивно на периферии под ободом, с образованием "шейки". На ободу диска одностороннее накопление деформации происходит на фоне знакопеременного неупругого деформирования. При этом ползучесть в каждом цикле следует за мгновенным пластическим деформированием обратного направления и начинается с неустановившегося участка с повышенной скоростью ползучести (рис. 2,  $\rho$  — интенсивность неупругой деформации в ободу).

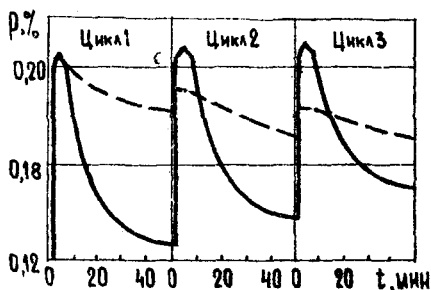


Рис. 2

Расчет по методике, в которой ползучесть описывается теорией упрочнения, пластические свойства — теорией течения с анизотропным упрочнением и взаимное влияние обоих видов неупругой деформации не учитывается, дает размах необратимой деформации за цикл, меньший почти на порядок (штриховая линия на рис.2). Естественно, что оценка работоспособности диска по результатам такого расчета может привести к серьезной ошибке. Так, при использовании формулы Коффина (при показателе степени, равном двум) оценка дол-

жесткости, что оценка работоспособности диска по результатам такого расчета может привести к серьезной ошибке. Так, при использовании формулы Коффина (при показателе степени, равном двум) оценка дол-

говежности диска будет превышена примерно в 40 раз. Вытяжка диска опасная из-за выборки радиального зазора между ротором и корпусом турбины, расчетом, не учитывающим взаимное влияние процессов длительного и быстрого неупругого деформирования, занижена примерно в 8 раз.

## ВЫВОДЫ

1. Увеличение силовой и тепловой нагруженности элементов конструкций, их ресурса делает все более актуальной проблему расчета кинетики циклического деформирования с максимально полным учетом наблюдаемых в эксперименте особенностей поведения материала. Обзор теорий для описания поведения материалов в этих условиях позволил выделить в качестве наиболее приемлемой с точки зрения адекватности предсказываемых свойств экспериментальным данным и доступности в практическом применении структурную математическую модель упруго-вязко-пластической среды.

2. Возможности структурной модели в отражении особенностей неупругого деформирования материалов при повторно-переменном нагружении проиллюстрированы на примере модели из двух идеально-пластических линейно-вязких подэлементов (ползучесть происходит со скоростью, связанной линейно с напряжением). Поведение этой модели удается описать наглядными аналитическими выражениями. Показано, что даже этой простой моделью качественно описываются многие наблюдаемые в экспериментах эффекты неупругого циклического деформирования.

3. Разработана методика определения параметров выбранного варианта структурной модели по экспериментальным данным о свойствах реального материала (кривые деформирования и кривые ползучести), отличающаяся высокой степенью автоматизации. Алгоритм определения параметров построен на использовании процедуры оптимального поиска по методу "деформируемого" многогранника. Предложены удобные формулы для определения параметров модели первого приближения.

4. В качестве примера показано определение параметров структурной модели стали X18H9T для расчетов при температуре 650°C. Результаты расчета кривых деформирования и ползучести полученной модели при циклическом нагружении с чередующимися в цикле быстрым пластическим деформированием и выдержкой при постоянном напряжении количественно близки данным соответствующих испытаний образцов из этой стали.



5. Показана возможность предложенной методики моделирования материалов для получения параметров модели при ограниченных экспериментальных данных, когда имеются данные только о первой фазе ползучести, и перспективность ее развития с целью определения параметров более сложных моделей среды.

6. Разработан метод расчета кинетики неупругого деформирования элементов конструкции на основе структурной модели среды, пригодный и для случая, когда соответствующая "упругая" задача не имеет решения в замкнутом виде. Параметры состояния конструкции определяются в выделенные моменты времени. При этом прирост неупругой деформации за интервал находится в соответствии с принятой моделью среды, а конечные значения напряжений и полных деформаций — в результате решения задачи об упругом деформировании рассматриваемого элемента конструкции при известных дополнительных деформациях (сумма тепловых и неупругих).

7. Данный метод расчета позволяет исследовать неупругое деформирование элементов конструкций при произвольных программах циклического неизотермического нагружения с учетом существенных в этих условиях эффектов деформационной анизотропии. Для расчета конструкций достаточно использование модели с небольшим числом подэлементов. При этом расчет оказывается близким по сложности к расчету с теориями идеальной пластичности и установившейся ползучести, совершенно не отражающим подобные эффекты.

8. Показано, что ЭВМ — программа расчета кинетики деформирования элементов конструкции на основе структурной модели среды может быть использована для расчетов при описании свойств материала другими известными теориями пластичности и ползучести и тем самым для сопоставления и исследования области применения этих теорий.

9. Решены задачи о неупругом деформировании бруса малой кривизны с произвольным закреплением концов и тонкого диска с плоской срединной поверхностью в условиях общего вида нагружения. Получены формулы для определения перемещения периферийного сечения рабочей лопатки турбины в поле центробежных сил при неравномерном по объему лопатки нагреве.

10. Получены параметры моделей сплава ЖС6К и стали ЭИ765, пригодные для расчетов элементов конструкций в характерном для этих материалов диапазоне температур.

Выполнено исследование кинетики неупругого деформирования рабочей охлаждаемой лопатки и диска конкретных газовых турбин в типичных условиях циклического воздействия инерционных нагрузок и температур. Показано, что существенное влияние на процесс неупругого деформирования и на значение параметров, определяющих работоспособность рассмотренных лопатки и диска оказывают наблюдаемые в экспериментах эффекты появления неустановившейся ползучести при повторно-переменном нагружении и взаимное влияние чередующихся пластических деформаций и ползучести. Доказано, что в таких условиях традиционные методы расчета приводят к серьезным ошибкам.

Основное содержание диссертации изложено в следующих работах:

1. Использование структурной модели для расчета формоизменения пластины при теплосменах. XI научное совещание по тепловым напряжениям в элементах конструкции. Тезисы докладов "Наукова думка", Киев, 1970. (Соавтор Садаков О.С.).

2. К описанию взаимного влияния процессов быстрого пластического деформирования и ползучести при циклическом нагружении. В сб. Вопросы прочности в машиностроении. Труды ЧИИ № 151, Челябинск 1974. (Соавторы Кульчихин Е.Т., Ребяков Ю.Н.).

3. Применение структурной модели упруго-вязко-пластической среды для расчета кинетики повторного неизотермического деформирования бруса. Там же. (Соавторы Мартыненко Н.Е., Садаков О.С.).

4. Неупругое деформирование охлаждаемых лопаток ГТД при циклическом нагружении. Сб. Конструкционная прочность лопаток турбин ГТД. Тезисы докладов IV научно-технической конференции. Куйбышев, 1976. (Соавтор Эрянов М.С.).

5. Применение структурной модели упруго-вязко-пластической среды для расчета кинетики деформирования элементов конструкций. Сб. Тепловые напряжения в элементах конструкции, вып. 16, "Наукова думка", Киев, 1976. (Соавторы Иванов И.А., Садаков О.С.).

6. Расчет турбинного диска при повторных нагружениях с учетом взаимного влияния процессов кратковременного и длительного неупругого деформирования. Проблемы прочности, 1976, № 8. (Соавторы Гохфельд Л.А., Кононов К.М., Садаков О.С.).