

М266525

НА ДОМ
НЕ ВЫДАЕТСЯ

МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ СССР

М о с к о в с к о е
ордена Ленина и ордена Трудового Красного Знамени
высшее техническое училище имени Н.Э.Баумана

НИГИН Александр Ариевич

На правах рукописи

ИССЛЕДОВАНИЕ ДЛИТЕЛЬНОЙ ПРОЧНОСТИ
В УСЛОВИЯХ КОНЦЕНТРАЦИИ НАПРЯЖЕНИЙ
ПРИ НЕСТАЦИОНАРНЫХ РЕЖИМАХ

(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

г. Москва 1976

Работа выполнена в Центральном ордена Трудового Красного
Знамени научно-исследовательском автомобильном и автомоторном
институте.

Научный руководитель -
доктор технических наук, профессор Малинин Н.Н.

Официальные оппоненты:

1. Доктор физико-математических наук, профессор Шестериков С.А.
2. Кандидат технических наук Кабелевский М.Г.

Ведущая организация - Указана в решении Ученого совета

Автореферат разослан " " 1975 г.

Защита диссертации состоится " " 1975 г.
на заседании специализированного Совета по динамике и прочности
машин по адресу: Москва, 107005, 2-я Бауманская ул., д. 5, МВТУ.

Ваш
направл:

ью, просим

С 1

ВТУ.

жалостин

120

M 266525

НТБ МГТУ им. Н.Э.Баумана



1266525

Исследование д
Нигин А.А.

Современный этап развития двигателей характерен стремлением к повышению их удельной мощности, экономичности и приемистости с одновременным увеличением ресурса работы. Улучшение термодинамических показателей двигателей и их динамических качеств связано прежде всего с ростом температуры рабочего тела.

Как правило, двигатели работают в условиях резко переменных режимов и частых пусков и остановов. При этом основные элементы подвергаются действию переменных силовых нагрузок и теплосмен, приводящих к неравномерному нагреву и охлаждению. Большие напряжения и сильный нагрев деталей при циклическом нагружении могут привести к накоплению необратимых пластических деформаций и быстрому разрушению конструкции.

Повышение требований к надежности и долговечности двигателей и специфичность условий их работы вызывает необходимость уточнения существующих методов расчета на прочность. При этом основным вопросом становится не определение напряжений, а оценка времени разрушения конструкции. Так как разрушение обычно происходит в местах концентрации напряжений, то особое значение имеет исследование процесса разрушения именно в этих зонах.

Для правильной оценки длительной прочности деталей со сложной конфигурацией необходимо исследование кинетики напряженного и деформированного состояний при ползучести материала, а также процесса накопления повреждений в местах концентрации напряжений. Это в первую очередь относится к расчету такого напряженного соединения, каким является елочный замок лопатки турбины. Нагрузка на элементы елочного замка значительно меняется во времени. Поэтому для достаточно надежного определения напряжений и оценки длительной прочности при циклическом нагружении замка необходимо принимать во внимание анизотропию материала, возникающую в результате деформирования за пределами упругости и в условиях ползучести, т.е. использовать те теории пластичности и ползучести, которые описывают поведение материала при нестационарном нагружении.

Целью настоящей работы является теоретическое и экспериментальное исследование длительной прочности деталей с концентраторами напряжений при нестационарном нагружении. Был разработан метод расчета, который позволяет получить время разрушения конструкции при переменных нагрузках. Кроме того, в данной работе

рассмотрена контактная задача для елочного замка в условиях ползучести материала, решение которой дает возможность не только оценивать длительную прочность соединения, но и определить допуски на основные размеры замка, соответствующие заданному ресурсу работы.

Диссертация состоит из введения и пяти глав. В конце работы сформулированы выводы, которые приводятся в автореферате.

Первая глава посвящена обзору литературы по исследованию концентрации напряжений в условиях ползучести и по расчету елочных замков. В работах А.Н.Грубина, Ч.Г.Мустафина, А.В.Бурлакова, А.Э.Угорского, Д.Р.Хэйхерста, В.Зигфрида, Н.А.Сира и Р.Д.Тетера применяются теории старения или течения. Использование этих теорий (особенно теории старения) в случае циклического нагружения, когда напряжения меняются не только по величине, но и по знаку может давать неверные результаты. Длительная прочность конструкций с концентраторами напряжений обычно оценивается либо методом линейного суммирования повреждений, либо с помощью используемого Ю.Н.Работновым, С.Т.Миленико и Л.М.Качановым предположения о жестко-ползучем теле, что дает возможность получить лишь качественный результат.

Как правило, при расчете елочных замков последовательно рассматриваются две задачи: исследование распределения усилий по зубьям без учета концентрации напряжений и определение напряжений в зонах концентрации при заданном распределении усилий (работы А.Н.Грубина, А.Г.Угодчикова, Ч.Г.Мустафина, А.С.Лейкина). Если такое разделение задачи справедливо при расчете в пределах упругости, то при расчете за пределами упругости и в условиях ползучести оно может давать значительные погрешности, так как распределение усилий по зубьям в этом случае в большой степени определяется пластическим течением в галтелях зубьев. Что касается расчета на длительную прочность елочных замков с учетом неравномерного распределения усилий по зубьям и концентрации напряжений при циклическом нагружении, то такой вопрос, по существу, в литературе еще не ставился.

Во второй главе рассмотрен метод расчета елочных замков в пределах упругости с использованием интегральных уравнений, предложенных Н.И.Мусхелишвили. Этот расчет необходим для оценки точности расчета методом конечных элементов, применяемого в дальней-

шем, а также для обоснования выбора размеров элементов. Интегральные уравнения решены методом последовательных приближений. При этом использована сложная итерация, которая позволяет получить напряжения с достаточной точностью через 10 - 12 приближений. Для проверки точности решения интегральных уравнений были определены напряжения в T -образном хвостовике лопатки. Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными Р.Е.Петерсона показало, что расхождение в величине максимального напряжения не превышает 2%. Следует отметить, что приведенный метод расчета может быть использован для решения довольно общего вида задач плоской теории упругости, а именно плоской задачи с односвязным контуром при силовых граничных условиях и распределенной инерционной нагрузке.

В третьей главе диссертации проведено теоретическое исследование ползучести и длительной прочности в условиях концентрации напряжений. При изучении зависимостей между напряжениями и деформациями введены понятия относительных напряжений $\bar{\sigma}_{ij} = \sigma_{ij}/\sigma_{\text{пл}}$ и деформаций $\bar{\epsilon}_{ij} = \epsilon_{ij}/\epsilon_{\text{пл}}$, где $\sigma_{\text{пл}}$ - предел пропорциональности материала, $\epsilon_{\text{пл}} = \sigma_{\text{пл}}/E$, E - модуль упругости первого рода. Предполагается, что кривые растяжения в относительных координатах для данного материала при различных температурах совпадают.

При деформировании материала за пределами упругости и в условиях ползучести возникает анизотропия свойств материала. Особенно существенно ее влияние на напряженное и деформированное состояние при циклическом нагружении элементов конструкций, когда напряжения меняются не только по величине, но и по знаку.

В настоящей работе используется теория пластичности с трансляционным упрочнением, основные уравнения которой были получены Р.А.Арутюняном и А.А.Вакуленко. Представляя девиатор действительных напряжений $\bar{\sigma}_{ij}$ в виде суммы девиаторов активных $\bar{S}_{ij}$ и базовых $\bar{p}_{ij}$ напряжений и предполагая, что изображающая точка не должна выходить за пределы поверхности текучести, получим

$$d\bar{\epsilon}_{ij}^p = \frac{2}{3} \frac{\bar{S}_{kl} d\bar{\sigma}_{kl}}{A^*(\bar{\sigma}_i)} \bar{S}_{ij},$$

$$d\bar{p}_{ij} = \frac{2}{3} A^*(\bar{\sigma}_i) d\bar{\epsilon}_{ij}^p,$$

где $d\bar{\epsilon}_{ij}^p$ - тензор приращений мгновенных пластических деформаций,

$\bar{\sigma}_i = (\frac{2}{3} \bar{\sigma}_{ij}' \bar{\sigma}_{ij}')^{\frac{1}{2}}$ - интенсивность напряжений,

$A^p(\bar{\sigma}_i) = \frac{1}{a \bar{\sigma}_i^b}$, a и b - постоянные для данного материала величины.

При исследовании ползучести материала применяется теория ползучести с анизотропным упрочнением с учетом повреждений, предложенная Г.М.Хажинским. Предполагается, что ползучесть представляет собой результат наложения двух противоположных процессов: механического упрочнения и термического разупрочнения. На первой стадии ползучести скорость упрочнения превышает скорость разупрочнения, что приводит к значительной анизотропии материала. На второй стадии скорости упрочнения и разупрочнения выравниваются и ползучесть происходит с постоянной скоростью. Возникшая на первых двух стадиях внутризеренная поврежденность материала ω начинает оказывать заметное влияние на ползучесть на третьей стадии, и скорость ползучести резко возрастает.

Кроме того, в процессе всех трех стадий ползучести развивается межзеренная поврежденность, которая в первую очередь зависит от разупрочнения материала и внутризеренной поврежденности, но сама на процесс ползучести не влияет. Поскольку растрескивание по границам зерен активизируется растягивающим напряжением, а при сложном нагружении главные площадки могут поворачиваться, то принимается, что межзеренная поврежденность характеризуется вектором $\bar{\Psi}_y$. При достижении критического значения той или иной поврежденности происходит мгновенное разрушение конструкции.

Основные уравнения теорий ползучести и длительной прочности имеют вид

$$d\bar{\epsilon}_{ij}^c = B^c \exp(-\frac{H}{T})(1+c\omega^m) sh \frac{\bar{\sigma}_i}{F} \frac{3d_{ij}}{2d_i} dt,$$

$$d\bar{x}_{ij} = \frac{2}{3} A^c(\bar{\sigma}_i) d\bar{\epsilon}_{ij}^c - D^c \exp(-\frac{H}{T})(1+c\omega^m) sh \frac{\bar{\sigma}_i}{F} \frac{\bar{x}_{ij}}{\bar{x}_i} dt,$$

$$d\omega = P(\bar{\sigma}_0) d\bar{\epsilon}_i^c,$$

$$d\bar{\Psi}_y = q D^c \exp(-\frac{H}{T})(1+c\omega^m) \exp(\kappa_1 \bar{\sigma}_y + \kappa_2 \bar{x}_i) dt,$$

где $d\bar{\epsilon}_{ij}^c$ - тензор приращений деформаций ползучести,
 $\bar{\alpha}_{ij}$ и $\bar{\chi}_{ij}$ - девиаторы активных и добавочных напряжений,

$$\bar{\alpha}_i = \left(\frac{2}{3} \bar{\alpha}_{ij} \bar{\alpha}_{ij} \right)^{\frac{1}{2}}, \quad \bar{\chi}_i = \left(\frac{2}{3} \bar{\chi}_{ij} \bar{\chi}_{ij} \right)^{\frac{1}{2}} \quad \text{и} \quad d\bar{\epsilon}_i^c = \left(\frac{2}{3} d\bar{\epsilon}_{ij}^c d\bar{\epsilon}_{ij}^c \right)^{\frac{1}{2}}$$

интенсивности активных и добавочных напряжений и приращений деформаций ползучести,

$\bar{\sigma}_0$ - среднее нормальное напряжение,

$\bar{\sigma}_y$ - нормальное напряжение в площадке с нормалью y ,

T - абсолютная температура,

t - время,

$$A^c(\bar{\sigma}_i) = \frac{1}{a_i(1+b_i\bar{\sigma}_i^{n_i})}, \quad A(\bar{\sigma}_0) = a_0 + b_0\bar{\sigma}_0 + c_0\bar{\sigma}_0^2, \quad B^c, D^c, H, F, c, m, a, b, n,$$

a_0, b_0, c_0, q, K , и K_2 - постоянные для рассматриваемого материала величины.

Приведенные уравнения теории ползучести настолько сложны, что решение их в замкнутом виде невозможно даже для простейших задач. Поэтому, естественно, расчет деталей сложной формы можно проводить только численными методами. В данной работе используется метод конечных элементов, причем тело разбивается на элементы треугольной формы. Такой простейший вид конечных элементов является наиболее удобным при решении задач с учетом деформаций пластичности и ползучести. Только в этом случае можно принять, что перемещения точек элемента линейно зависят от координат, и поэтому удовлетворяются уравнения сплошности как внутри каждого элемента, так и при переходе от одного элемента к другому. Кроме того, деформации и напряжения в пределах каждого элемента при этом получаются постоянными, и тогда с началом пластического течения не возникает необходимости определения границы упругой и пластической областей в элементе.

Методом конечных элементов была решена задача плоской деформации с постоянной осевой деформацией. Уравнение, связывающее приращения деформаций с приращениями напряжений, можно записать в виде

$$\{\alpha\sigma\} = \{D\}(\{\alpha\epsilon\} - \{\alpha\epsilon^0\}),$$

где $[D]$ - симметричная матрица порядка (3×3) , характеризующая механические свойства материала,

$\{d\varepsilon^0\}$ - матрица приращений начальных деформаций.

Определение этих матриц составляет основную трудность при расчете. При решении задачи необходимо разбить весь период эксплуатации конструкции на интервалы, в пределах которых напряжения и деформации меняются незначительно. На каждом шаге расчет представляет собой решение задачи теории упругости для неоднородного анизотропного тела. Оно сводится к решению системы линейных алгебраических уравнений с неизвестными приращениями перемещений узлов элементов δ

$$[G]\{\delta\} = \{dF\} + \{dF\}_p + \{dF\}_{\varepsilon^0},$$

где $[G]$ - матрица жесткости,

$\{dF\}$ - матрица приращений внешних контурных сил в узлах элементов,

$\{dF\}_p$ и $\{dF\}_{\varepsilon^0}$ - матрицы приращений внешних сил в узлах, эквивалентных приращениям распределенной нагрузки и приращениям начальных деформаций.

Так как осевая деформация заранее неизвестна, то ее величина определяется из условия равенства нулю внешней осевой силы. На каждом шаге приращения деформаций и напряжений будут линейно зависеть от приращений времени. Поэтому можно не задаваться величиной интервала времени, а проводить расчет для единичного интервала. В дальнейшем его величина определяется таким образом, чтобы максимальное приращение напряжений не превышало заданной величины. Это дает возможность, сохранив необходимую точность, уменьшить количество шагов при расчете. По изложенному методу решения задачи плоской деформации была составлена программа на алгоритмическом языке "Алгол 60".

Четвертая глава посвящена экспериментальному исследованию ползучести и длительной прочности образцов с концентраторами напряжений и сопоставлению опытных и расчетных данных. Были проведены испытания гладких цилиндрических образцов и плоских образцов с надрезом при постоянной и ступенчатой нагрузках. Толщина

плоских образцов выполнялась такой, чтобы места концентрации напряжений находились в условиях плоской деформации. В качестве исследуемых материалов были выбраны сталь ЭИ-48Г и сплав ЖС6-К - материалы, широко применяемые в энергомашиностроении. Все испытания проводились в отделе металлов НАМИ, в лаборатории кафедры "Сопротивление материалов и динамика и прочность машин" МВТУ им. Н.Э.Баумана совместно с В.Н.Бойковым и Ю.И.Бойковым и в лаборатории котлотурбинных материалов ЦНИИТМАШ совместно с И.И.Труниным и Г.А.Шабан. Кратковременные испытания производились на прессе "Baldwin" с гидравлическим нагружением, а испытания на ползучесть и длительную прочность на машинах ИП-2 и АИМА-5 при температурах для стали ЭИ-48Г - 700°C и для сплава ЖС6-К - 900°C. В результате были получены диаграммы деформирования, кривые ползучести и кривые длительной прочности для гладких образцов и образцов с надрезом.

При ступенчатом нагружении рассматривались два случая: увеличение и уменьшение нагрузки. Изменение нагрузки производилось после того, как образец деформировался примерно половину времени до разрушения. Кривые ползучести гладких образцов при ступенчатом нагружении, построенные по экспериментальным данным, сопоставлялись с кривыми ползучести, полученными по теориям ползучести с изотропным (теория упрочнения) и анизотропным упрочнением. Было показано, что теория ползучести с анизотропным упрочнением дает лучшее совпадение экспериментальных и расчетных данных, особенно при возрастании нагрузки. Время разрушения гладких образцов на втором этапе нагружения, определенное по результатам испытаний, сравнивалось с временем разрушения, полученным расчетным путем по используемой в работе теории длительной прочности, и временем разрушения, найденным методом линейного суммирования повреждений. Было установлено, что учет внутризеренной и межзеренной повреждений позволяет получить результаты, достаточно хорошо согласующиеся с экспериментальными данными при ступенчатом нагружении.

Проведенный расчет образцов с надрезом показал, что при нагружении максимальные напряжения возникают на контуре галтели. В дальнейшем в процессе ползучести они быстро уменьшаются, однако концентрация напряжений все же остается значительной и при установившейся ползучести, и в момент разрушения. Пик напряжений

постепенно смещается к внутренним слоям, где и зарождаются первые трещины. Расчеты показали, что обычно разрушение происходит при достаточно больших местных деформациях в зоне концентратора. У образцов из стали ЭИ-48I первые макротрещины возникают на третьей стадии ползучести (параметр внутризеренной поврежденности достигает критического значения). Совпадение кривых длительной прочности для образцов с надрезом, полученных экспериментально и расчетным путем, оказалось достаточно хорошим, особенно для образцов из стали ЭИ-48I.

В результате расчета образцов с надрезом при ступенчатом нагружении было показано, что напряжения после изменения нагрузки значительно отличаются от напряжений, полученных при соответствующей постоянной нагрузке. В дальнейшем это различие уменьшается, но тем не менее остается заметным даже при установившемся процессе деформирования. Таким образом, можно сделать вывод, что при расчете важно учитывать историю нагружения конструкции, и в случае переменных нагрузок необходимо использовать теорию ползучести, описывающую поведение материала при нестационарном нагружении. Теоретически найденное время разрушения при ступенчатом нагружении образцов с надрезом было сопоставлено с результатами эксперимента, причем согласование опытных и расчетных данных получилось вполне удовлетворительным.

Таким образом, как следует из приведенного в диссертации сравнения экспериментальных и теоретических данных, предложенный метод может быть использован для расчета деталей с концентраторами напряжений при нестационарном нагружении в условиях ползучести материала.

В пятой главе приведено решение контактной задачи теории ползучести для елочного замка лопатки турбины. При этом одновременно рассматривается и контактная задача и определяются напряжения в местах концентрации. Так как толщина замка значительно превышает его поперечные размеры, а нагрузки практически не меняются по толщине, то можно считать, что елочный замок находится в условиях плоского деформированного состояния. Тогда при решении контактной задачи для елочного замка в условиях ползучести и нестационарного нагружения можно использовать метод расчета, изложенный в главе II. В работе С.А. Чана и И.С. Тьюса показано, что распределение усилий по зубьям и величины напряжений при-

тически не зависят от сил трения, возникающих в местах контакта в зубьях замка. Поэтому в настоящей работе трение в местах контакта не учитывается, что позволяет получить матрицу жесткости симметричной и тем самым значительно уменьшить объем вычислений.

Матрицы жесткости для выступа диска и хвостовика лопатки с учетом истинных механических свойств материала определяются из решения задачи плоской деформации. Так как соседние элементы диска и лопатки при отсутствии сил трения могут свободно смещаться вдоль линии контакта, то для приращений перемещений узлов i и n в местах контакта можно записать следующее выражение:

$$(\delta_{ix} - \delta_{nx}) \sin \varphi = (\delta_{iy} - \delta_{ny}) \cos \varphi,$$

где φ - угол наклона линии контакта к оси x .

Учитывая это соотношение, а также то, что силы в узлах контакта являются внешними для выступа диска и хвостовика лопатки, рассматриваемых в отдельности, можно построить полную матрицу жесткости и матрицу приращений эквивалентных внешних сил для всего соединения.

Схема расчета при решении контактной задачи остается такой же, как и при решении задачи плоской деформации. Необходимо только на каждом шаге проводить исследование возможности контакта соседних узлов диска и лопатки. Такой метод расчета позволяет решать контактную задачу в условиях ползучести материала при заранее неизвестной площадке контакта. В частности, при расчете елочного замка можно определить, какие зубья или какие участки зубьев находятся в контакте в любой момент времени, а также получить распределение усилий по зубьям и по грани зуба, что очень важно при проектировании оптимальной конструкции замка. Следует отметить, что расчет елочного замка чрезвычайно трудоемок, и на ЭВМ "Минск-22" реально можно провести расчет только нескольких циклов нагружения. Однако обычно процессы деформирования и накопления повреждений устанавливаются через несколько циклов, и поэтому по расчету небольшого числа циклов нагружения можно судить о длительной прочности соединения.

В качестве примера был рассмотрен конкретный елочный замок лопатки турбины. Для проверки точности расчета замка методом

конечных элементов напряжения, полученные в пределах упругости этим методом, сопоставлялись с напряжениями, определенными при решении интегральных уравнений плоской задачи теории упругости. Показано, что точность расчета методом конечных элементов при рассмотренном числе элементов вполне удовлетворительна.

Был проведен расчет елочного замка для наиболее тяжелого с точки зрения прочности цикла нагружения: выхода двигателя на номинальный режим и работы на этом режиме с последующим выходом на режим холостого хода. Как показали расчеты, распределение усилий и напряжений в елочном замке, а также длительная прочность соединения в значительной степени зависят от начальных зазоров между зубьями. Во время работы двигателя на номинальном режиме при отсутствии начальных зазоров между зубьями большая часть нагрузки воспринимается первыми зубьями. Наибольшие напряжения возникают в верхней галтели выступа диска. Это место и определяет длительную прочность всего соединения, которая составляет 10 тыс. часов при плотном начальном прилегании всех зубьев. Чтобы разгрузить первые зубья замка, необходимо выполнить начальные зазоры между первыми и вторыми парами зубьев хвостовика лопатки и выступа диска. При зазорах между первыми (0,02 мм) и вторыми (0,01 мм) парами зубьев длительная прочность соединения оказывается в семь раз выше, чем при их отсутствии. Если сделать начальные зазоры между третьими (0,02 мм) и вторыми (0,01 мм) парами зубьев замка, то всю нагрузку будут воспринимать первые зубья, и длительная прочность елочного замка уменьшится в 12 раз по сравнению с замком без начальных зазоров.

Как правило, выступ диска нагружен больше хвостовика лопатки, что в значительной степени объясняется неравномерным распределением сил по грани зуба. Для создания более равнопрочной конструкции необходимо выполнить различный наклон контактирующих плоскостей зубьев. При угле раскрытия ступа 80° максимальные напряжения уменьшились на 14%, а длительная прочность елочного замка возросла в семь раз.

В результате проведенного расчета елочного замка при различных начальных зазорах между зубьями и углах раскрытия ступа было выбрано поле допусков на размеры замка, которое соответствует заданному ресурсу работы.

ВЫВОДЫ

1. В результате проведенного исследования разработан метод расчета на длительную прочность деталей с концентраторами напряжений при деформировании материала за пределами упругости и в условиях ползучести при нестационарном нагружении.

2. Показано, что использование теории ползучести с анизотропным упрочнением с учетом повреждений материала позволяет существенно точнее, чем обычные технические теории ползучести, описать процессы деформирования и разрушения материалов при переменных нагрузках.

3. Установлено, что применение метода конечных элементов для расчета конструкций сложной конфигурации дает возможность определять напряжения в зонах концентрации при любом законе, связывающем напряжения и деформации.

4. В результате проведенного экспериментального и теоретического исследования ползучести и длительной прочности гладких цилиндрических образцов и плоских образцов с надрезом при постоянной и ступенчатой нагрузках и сопоставления опытных и расчетных данных подтверждена возможность использования разработанного метода для оценки времени разрушения конструкций при нестационарном нагружении.

5. На основе решения контактной задачи теории ползучести предложен метод расчета елочного замка лопатки турбины, который дает возможность определять длительную прочность соединения при циклическом нагружении с учетом неравномерного распределения усилий по зубьям замка и концентрации напряжений в галтелях зубьев.

6. Разработан метод решения интегральных уравнений плоской задачи теории упругости и проведен расчет елочного замка в пределах упругости, который показал удовлетворительную точность метода конечных элементов.

7. Для повышения длительной прочности елочного замка необходимо стремиться к тому, чтобы нагрузка на последние зубья была больше, чем на первые; начальные зазоры надо выполнять между первыми парами зубьев при плотном прилегании последних, контакт

в зубьях до начала работы должен осуществляться обжим тела выступов диска.

8. В результате проведенного расчета элочного замка лопатки турбины даны конкретные рекомендации по величине допусков на начальные зазоры между зубьями и на углы раскрытия стыка, соответствующие заданному ресурсу работы.

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих статьях:

1. Нигин А.А. Напряженное состояние зубца элочного замка лопатки газовой турбины, "Известия вузов. Машиностроение", 1971, № 2.
2. Нигин А.А. Определение напряжений в элочном замке, "Известия вузов. Машиностроение", 1972, № II.
3. Бойков В.Н., Бойцов Ю.И., Малинин Н.Н., Нигин А.А. Экспериментальное исследование влияния концентрации напряжений на длительную прочность, "Известия вузов. Машиностроение", 1974, № 10.
4. Малинин Н.Н., Нигин А.А. Длительная прочность образцов с концентратором напряжений при нестационарном режиме нагружения, "Известия вузов. Машиностроение", 1974, № II.