

На правах рукописи

**Арышенский Евгений Владимирович**

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ РАСЧЕТА  
НАКОПЛЕННОЙ ДЕФОРМАЦИИ  
ПРИ ГОРЯЧЕЙ РАСКАТКЕ КОЛЕЦ ГТД  
С УЧЕТОМ МЕЖДЕФОРМАЦИОННЫХ ПАУЗ**

Специальность: 05.03.05 – Технологии и машины обработки давлением

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Самара 2009

Работа выполнена на кафедре обработки металлов давлением государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования “Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева” (СГАУ)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор  
член-корреспондент РАН  
Гречников Федор Васильевич

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Шитарев Игорь Леонидович  
  
кандидат технических наук  
Каранашев Руслан Ахмедович

Ведущая организация: ОАО “Металлист”, г. Самара

Защита состоится       ноября 2009 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.215.03, созданного при ГОУ ВПО “Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева” по адресу: 443086, Самара, Московское шоссе, 34.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГОУ ВПО “Самарский государственный аэрокосмический университет имени академика С.П. Королева”.

Автореферат разослан       октября 2009 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета  
кандидат технических наук

Клочков Ю.С.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** Одними из важнейших деталей в авиационном двигателестроении являются кольца ГТД, служащие соединительными элементами рабочих лопаток турбины, компрессора и других деталей. Выход хотя бы одного кольца из строя может привести к поломке всего двигателя, то есть аварийной ситуации. Поэтому к кольцевым деталям авиационных газотурбинных двигателей работающих, в условиях высоких температур и динамических нагрузок предъявляются высокие требования по однородности структуры и уровню механических свойств.

Наиболее распространенным способом получения кольцевых деталей ГТД является горячая раскатка из ковальной заготовки. Характерным недостатком этого процесса является появление в кольцевой детали при окончательной термообработке участков с крупным зерном, вследствие получения металлом критических значений степени пластической деформации. Разнозернистая структура кольца приводит, естественно, к резкому снижению уровня механических свойств и ресурса этих деталей в сложных условиях эксплуатации.

Предотвратить возникновение в заготовке критических значений деформации, а следовательно и крупнозернистости мог бы метод расчета величины накопленной за весь цикл раскатки степени деформации с учетом процессов упрочнения и разупрочнения. Фактически раскатка кольца представляет собой совокупность многократных локальных деформационных актов, в которых происходит упрочнение. Между этими локальными актами обжаты наступают междеформационные паузы, в которых происходит частичная рекристаллизация, снимающая часть деформационного упрочнения.

В связи с этим для расчета величины накопленной деформации за весь процесс раскатки необходимо вначале определить степень деформации заготовки в каждом локальном акте обжаты и долю рекристаллизованного объема металла после частичной рекристаллизации в междеформационной паузе.

Таким образом, исследования, направленные на совершенствование технологических процессов горячей раскатки кольцевых деталей путем разработки методов расчета накопленной степени деформации с учетом локальных обжаты и частичной рекристаллизации в междеформационных паузах является актуальными для получения высокого уровня механических свойств и эксплуатационных параметров колец ГТД.

**Целью данной работы** является совершенствование технологических режимов горячей раскатки кольцевых деталей ГТД на основе разработанной конечно-элементной модели расчета накопленной деформации с учетом температурно-скоростных параметров деформирования, длительности и количества междеформационных пауз.

**Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:**

1. Установить зависимости изменения доли рекристаллизованного объема кольцевой заготовки от температуры нагрева, степени деформации и времени протекания междеформационной паузы для сплавов ХН68ВМТЮК-ВД и ХН45ВМТЮБР-ИД (типичных материалов для колец ГТД).

2. Разработать конечно-элементную модель для расчета значений накопленной за процесс раскатки степени деформации, с учетом температуры нагрева заготовки, величины локальных обжаты и длительности каждой междеформационной паузы.

3. На основе разработанной математической модели исследовать влияние температуры нагрева заготовок, величины локальных обжатий, продолжительности и количества междеформационных пауз на степень накопленной деформации за весь цикл раскатки.

4. Разработать рекомендации по выбору температурно-скоростных и деформационных режимов горячей раскатки количества и продолжительности междеформационных пауз, обеспечивающая расчетные значения накопленной деформации, однородность макроструктуры и требуемый уровень механических свойств кольцевых заготовок.

5. Провести опытно-промышленную проверку адекватности разработанных технологических режимов горячей раскатки кольцевых деталей требованиям по макроструктуре и уровню механических свойств.

**Научная новизна работы заключается в следующем:**

1. Впервые процесс горячей раскатки колец ГТД рассмотрен как процесс с дробной деформацией, состоящей из многократных локальных обжатий и последующих многократных актов частичной рекристаллизации в междеформационных паузах.

2. Впервые построена конечно-элементная модель, позволяющая исследовать горячую раскатку кольцевых заготовок с учетом температуры нагрева металла, степени локальных обжатий и длительности междеформационных пауз.

3. Впервые установлены зависимости изменения доли рекристаллизованного объема кольцевой заготовки из сплавов ХН68ВМТЮК-ВД и ХН45ВМТЮБР-ИД (типичных материалов для колец ГТД) от температуры нагрева, степени деформации и времени протекания междеформационной паузы.

4. Впервые с помощью тепловизора ThermoCAM P65 исследовано тепловое поле при раскатке колец ГТД и установлена оптимальная продолжительность процесса деформации.

**Достоверность научных результатов** исследований подтверждена применением для моделирования наиболее точного и современного метода исследования пластических сред (метода конечных-элементов), использованием для реализации модели программного продукта на современном языке C++, а так же широким спектром экспериментальных исследований.

**Методы исследования.** Исследования напряженно-деформированного состояния при раскатке колец ГТД выполнены с помощью конечно-элементной модели, на основе которой создан программный продукт на языке C++. Экспериментальные исследования заключались в осадке и травлении образцов из сплавов ХН68ВМТЮК-ВД и ХН45ВМТЮБР-ИД и исследовании их макроструктуры с помощью прибора Axiovert 40 MAT. Экспериментальная раскатка кольца производилась на раскатной машине РМ1200 с последующей вырезкой из кольцевой заготовки образцов и исследования механических свойств на растяжной машине ЦДМУ 30 и макроструктуры с помощью прибора Axiovert 40 MAT. Температурное поле изучалось с помощью тепловизора ThermoCAM P65.

**Автор защищает** конечно-элементную математическую модель, позволяющую анализировать процесс раскатки колец ГТД с учетом дробности деформации. Установленные закономерности изменения доли рекристаллизованного объема от температуры, степени деформации и времени протекания междеформационной паузы для сплавов ХН68ВМТЮК-ВД, ХН45ВМТЮБР-ИД. Распределение локальных обжатий и скорости вращения приводного вала при раскатке колец ГТД, обеспечивающие за-

данные значения степени накопленной деформации. Экспериментальные исследования теплового поля, деформируемой кольцевой заготовки.

### **Практическая ценность работы.**

1. На основе разработанной математической модели решена задача определения значений накопленной за весь цикл раскатки степени деформации в зависимости от конкретных параметров процесса, что позволяет обеспечить её оптимальные значения перед окончательной термообработкой.

2. Разработаны рекомендации по выбору оптимальных температурно-скоростных режимов локальных обжатий кольцевой заготовки с учетом величины подачи и скорости вращения приводного вала, обеспечивающих однородность структуры и высокие механические свойства.

3. Полученные в диссертации результаты использованы в ОАО “Моторостроитель” и ОАО СНТК “Двигатели НК” им. Н.Д. Кузнецова при разработке технологии горячей раскатки кольцевых заготовок из сплавов ХН68ВМТЮК-ВД и ХН45ВМТЮБР-ИД

**Апробация работы.** Основные результаты работы доложены и обсуждены на следующих конференциях: Королевские чтения (Самара, 2007г.), Всероссийская научно-техническая конференция студентов “Студенческая весна 2008: машиностроительные технологии” (Москва 2008, г.), Решетневские чтения (Красноярск 2008 г.). Международная научно-техническая конференция “Металлофизика, механика материалов наноструктур и процессов деформирования” (г. Самара 2009 г.)

**Публикации.** По теме диссертации опубликовано 6 работ, в том числе 2 статьи в ведущих рецензируемых журналах и изданиях, рекомендованных ВАК.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, основных результатов и выводов, списка литературы 133 наименования, содержит 138 страниц машинописного текста, 58 рисунков, 3 таблицы.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность рассматриваемой проблемы, изложены цель и задачи исследования, освещены научные и практические результаты, а также положения, выносимые на защиту.

**В первой главе:** Рассмотрены основные способы производства колец авиационных ГТД, проведен анализ работ авторов В.А. Костышева, И.Л. Шитарева, П.И. Полухина, А.И. Целикова, Л.П. Котельникова, Т.Т. Шалимова, В.Н. Выдрина, В.Н. Зиновьева, посвященных раскатке колец из ковальной заготовки. В ходе него было установлено, что наряду с определенными преимуществами этот способ имеет следующий основной недостаток, а именно: наличие зон с крупным зерном. Такие зоны отрицательно сказываются на механических и эксплуатационных свойствах колец ГТД. Рассмотрены аналитические и экспериментальные методы исследования очага деформации при раскатке, дана краткая характеристика сплавов ХН68ВМТЮК-ВД и ХН45ВМТЮБР-ИД (типичных материалов для колец ГТД).

**Во второй главе** проанализирован механизм формообразования при горячей раскатке, как процесса с дробной деформацией состоящей из многократных локальных актов деформирования и последующей частичной рекристаллизации кольцевой заготовки в междеформационных паузах. Эта особенность схематично представлена на рис. 1.

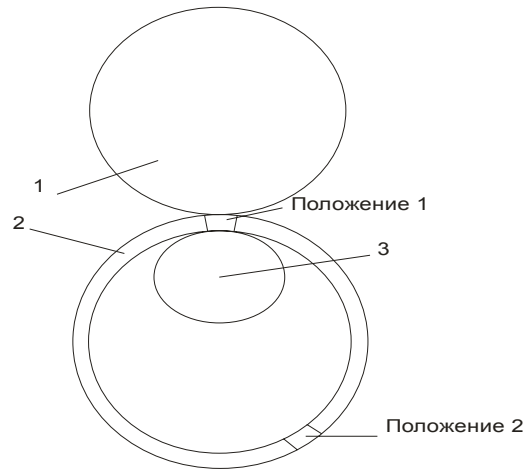


Рис. 1 Схематичное представление процесса дробной деформации при горячей раскатке

Находясь в валках (положение 1) кольцевая заготовка получает определенную степень пластической деформации. Вне валков (положение 2), то есть в междеформационной паузе, протекает процесс рекристаллизации, приводящий к частичному разупрочнению. Затем металл снова попадает в валки и цикл повторяется. Естественно, величина накопленной деформации за весь процесс раскатки, определяющей собой общее упрочнение, то есть долю нерекристаллизованного объема перед окончательной термообработкой, может быть определена на основе расчетов степени деформации в каждом локальном акте обжатия и доли рекристаллизованного объема металла в соответствующей междеформационной паузе.

Расчет степени накопленной деформации предлагается определять по следующей формуле:

$$\Lambda = \sum_1^N (1 - X_{ji}) \ln(1 + \varepsilon_{ji-1}) \quad (1)$$

где  $X_{ji}$  - доля рекристаллизованного объема в  $j$  конечном элементе перед  $i$ -ым проходом, причем если  $i = 0$  то  $X_{ji} = 0$ ;

$\varepsilon_{ji}$  - степень деформации в  $j$  конечном элементе после  $i - 1$  прохода.

Доля рекристаллизованного в объема  $X$  в междеформационной паузе находится по формуле предложенной Авраами с учетом установленных экспериментальных зависимостей статической рекристаллизации сплавов ХН68ВМТЮК-ВД и ХН45ВМТЮБР-ИД.

$$X = 1 - \exp(-B\tau^k) \quad (2)$$

где  $B$  - коэффициент для учета величин скорости и температуры деформации,

$\tau$  - время выдержки,

$k$  - коэффициент зависящий от пространственной размерности модели.

Далее в данной главе для обоснования применимости формулы Авраами (2) с учетом особенностей рекристаллизации сплавов ХН68ВМТЮК-ВД и ХН45ВМТЮБР-ИД, был разработан план эксперимента по определению  $B$  коэффициента для учета величины скорости и температуры деформации. Для нахождения коэффициента  $B$  были подвергнуты осадке и последующей выдержке в течение (1 с, 5с, 10 с, 25 с, 50 с, 90 с) цилиндрические образцы из сплава ХН68ВМТЮК-ВД и ХН45ВМТЮБР-ИД.

После выдержки, чтобы остановить первичную рекристаллизацию образцы охлаждали в воде. Затем в образцах производился подсчет отношения количества вновь образовавшихся зерен к деформированным. После обработки полученных данных были построены зависимости доли рекристаллизованного объема  $X$  от времени выдержки. Эксперимент был проведен для температур  $950^{\circ}\text{C}$ ,  $1050^{\circ}\text{C}$ ,  $1150^{\circ}\text{C}$ , и степеней деформации 10 %, 25 %, 40 %. Для каждого сочетания деформации и температуры было определен коэффициент  $B$ . На рис. 2 приведен типичный, для установленных зависимостей, график.

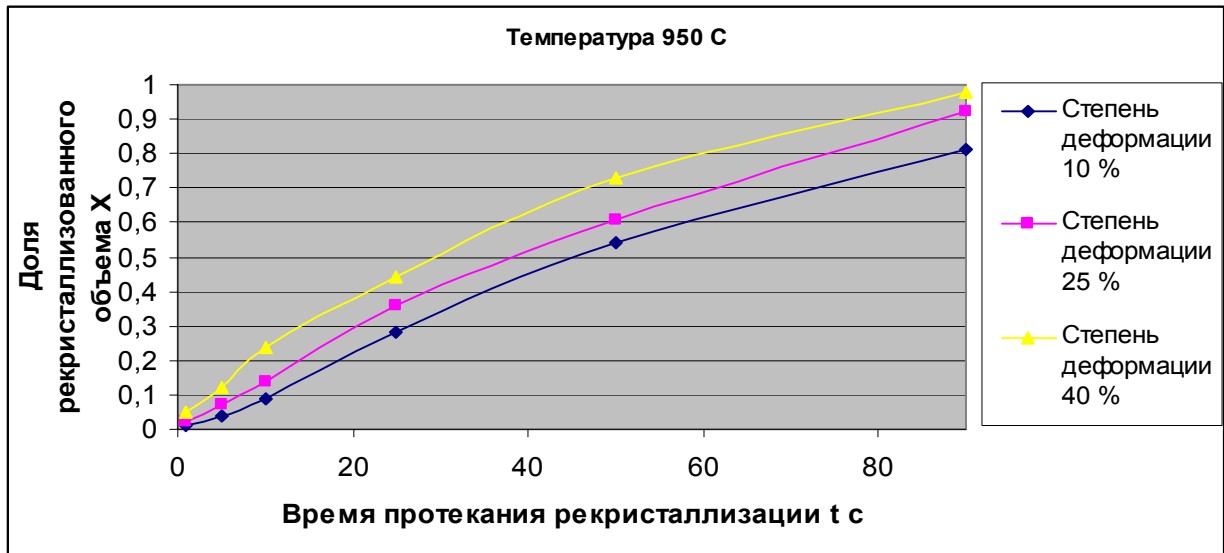


Рис. 2 Зависимость доли рекристаллизованного объема  $X$  от времени протекания рекристаллизации при температуре  $950^{\circ}\text{C}$  (сплав  $\text{XH68BMTЮК-ВД}$ )

Таким образом, найденные значения  $\tau_{0,5}$  для ряда температур и степеней деформаций позволяют использовать формулу (2) для нахождения доли рекристаллизованного объема металла в междеформационной паузе.

**В третьей главе** диссертации представлены этапы разработки конечно-элементной модели горячей раскатки кольцевых деталей ГТД.

При разработке конечно-элементной модели учтено, что, благодаря симметрии, структура и свойства раскатанного кольца идентичны для всех сечений по окружности. Учитывая это обстоятельство, модель была построена не для всего кольца, а только для сегмента равного 6 длинам очага деформации (рис.3).

Сегмент разбивается на треугольные элементы, для каждого из которых задаются усилия и перемещения. Далее проводится аппроксимация полей перемещений, деформаций и напряжений строится локальная матрица жесткости. Глобальная матрица жесткости  $K$  - представляет собой алгебраическую сумму локальных матриц каждого элемента.

$$\|K\| \cdot d = f \quad (3)$$

где  $d$  – перемещения узлов конечных элементов,  
 $f$  – силы действующие в узлах конечных элементов.

Задавая для уравнения (3) граничные условия т.е значения  $d$  и  $f$  мы находим матрицу жесткости. Сама матрица характеризует собой напряженно-деформированное состояние элемента:

$$\|K\| = \int \|B\|^T \cdot \|D\| \cdot \|B\| \cdot dF \quad (4)$$

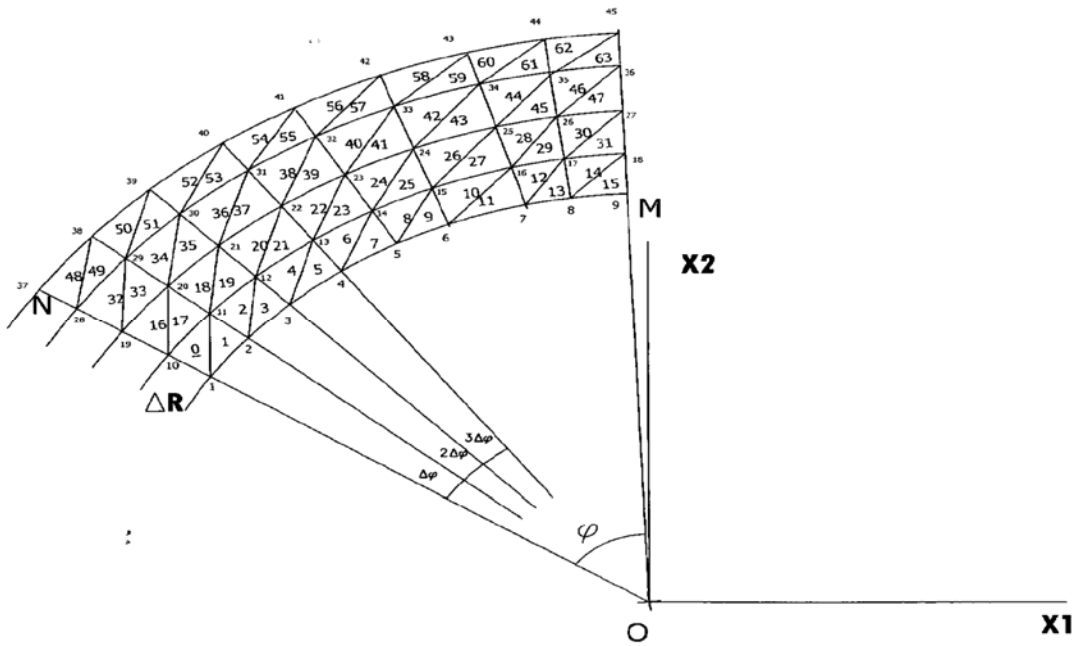


Рис. 3 Разбиение области решения на конечные элементы

$\|B\|$  - выражает изменения координат узлов треугольного элемента при сохранении его площади и связывает перемещение в его узлах с накопленной деформацией.

$\|D\|$  - выражает связь между тензором деформации и тензором напряжений.

$T$  - объемные силы.

Подробнее с этим выражениями можно ознакомиться в любом источнике описывающим применения метода конечных элементов для обработки металлов давлением.

Затем рассмотрим задание граничных условий для приводного и не приводного валков.

На приводном валке известна скорость вращения, но неизвестно взаимное смещение поверхностей металла и валка. Был введен фиктивный слой элементов. Покажем его на примере элемента, с узлами 7,6 (рис 4 а). Эти узлы движутся, как жестко связанные с валком. Узлы контактного слоя металла 5 (рис. 4 а) движутся по поверхности валка.

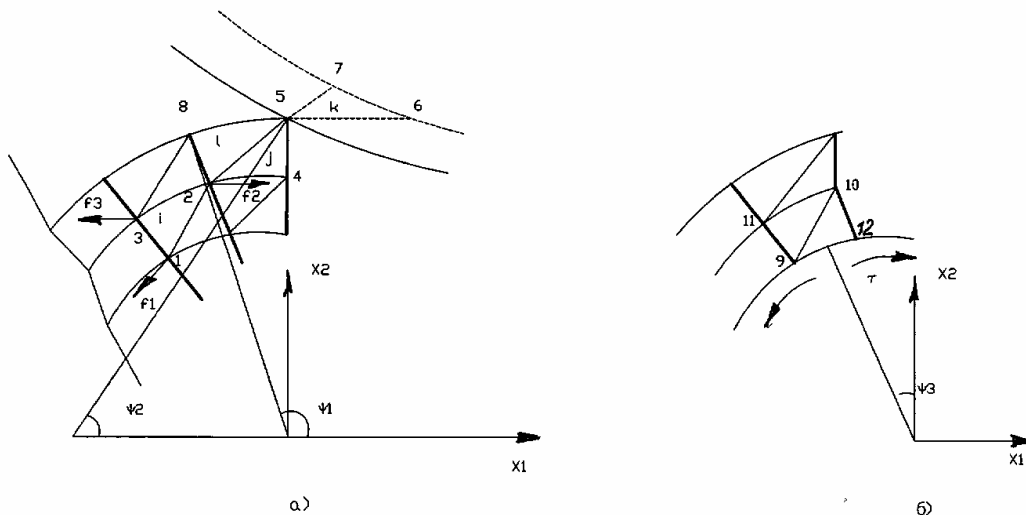


Рис 4 Задание граничных условий в задаче о деформировании сегмента



Матрица жесткости элемента К модифицируется с помощью показателя трения  $m$ . Элементы матрицы жесткости умножаются на  $\frac{m}{m-1}$ . При  $m$  стремящемся к 0 элемент делается более жестким, моделируя низкое трение. При  $m \rightarrow 1$  моделируется “прилипание” материала к валкам. Элементы не моделируют слой смазки, но моделируют действие смазки. Каждый элемент фиктивного слоя создается на момент построения соответствующего реального элемента. Матрица реального и фиктивного элементов могут быть сопоставлены и совместно, решены в уравнении (5). Перемещения фиктивных узлов известны, то есть они движутся, как жестко связанные с валком.

Уравнения (4) для узла 5 (рис. 4 а) будут иметь следующий вид.

$$k_{9,3}d_{23} + k_{9,4}d_{22} + k_{9,7}d_{41} + k_{9,8}d_{42} + k_{9,9}d_{51} + k_{9,10}d_{52} + k_{9,15}d_{81} + k_{9,16}d_{82} + k_{9,13}d_{71} + k_{9,14}d_{72} + k_{9,11}d_{61} + k_{9,12}d_{62} = f_{51}, \quad (5)$$

$$k_{10,3}d_{21} + k_{10,4}d_{22} + k_{10,7}d_{41} + k_{10,8}d_{42} + k_{10,9}d_{51} + k_{10,10}d_{52} + k_{10,15}d_{81} + k_{10,16}d_{82} + k_{10,13}d_{71} + k_{10,14}d_{72} + k_{10,11}d_{61} + k_{10,12}d_{62} = f_{52}, \quad (6)$$

Так как усилие в узле 5 нормально к поверхности вала, то имеем:

$$f_{s2} \cos \varphi_2 = f_{s1} \sin \varphi_2, \quad (7)$$

Условие непроникновения поверхности вала

$$d_{s1} \cos \varphi_2 = d_{s2} \sin \varphi_2, \quad (8)$$

При составлении глобальной матрицы жесткости, преобразуя уравнения (5, 6) с учетом (7, 8), исключая  $f_{51}, f_{52}, d_{52}$  при решении системы (4) можно воспользоваться методом Гауссова исключения.

Для неприводного вала в первой половине дуги захвата силы направлены против движения металла, во второй - по направлению движения (рис. 4, б). Для каждого узла в контакте с валком направление действия сил известно.  $P$  - нормальное давление,  $\tau = \mu P$  - сила трения,  $\mu$  - коэффициент трения.

Рассмотрим уравнение (4), которое в развернутом виде для узла 9 запишется следующим образом (рис. 4,б).

$$k_{17,17}d_{91} + k_{17,18}d_{92} + k_{17,19}d_{101} + k_{17,20}d_{102} + k_{17,21}d_{111} + k_{17,22}d_{112} = f_{91} = \mu P \cos \varphi_3 - P \sin \varphi_3, \quad (9)$$

$$k_{18,17}d_{91} + k_{18,18}d_{92} + k_{18,19}d_{101} + k_{18,20}d_{102} + k_{18,21}d_{111} + k_{18,22}d_{112} = f_{92} = P \sin \varphi_3 + \mu P \cos \varphi_3, \quad (10)$$

При решении уравнений (9) методом Гаусса, учтем условие непроникновения материала заготовки в неприводной валок.

$$d_{91} \cdot \sin \varphi_3 = d_{92} \cdot \cos \varphi_3 \quad (11)$$

Это условие позволит исключить из системы уравнений (4)  $d_{92}$ . Это преобразование проделываем для всех уравнений, содержащих узлы, лежащие на поверхности неприводного вала.

Для построения модели поля температуры и расчета теплового поля использовано уравнение теплового баланса для отдельного элемента, имеющего вид:

$$T_{1j+1} = \frac{1}{Vol_{ABC} c \rho} \left( \lambda \left( \Delta y_{A'C'} \frac{T_{2j} - T_{1j}}{\Delta x_{O1O2}} + \Delta y_{A'B'} \frac{T_{3j} - T_{1j}}{\Delta x_{O1O3}} + \Delta y_{B'C'} \frac{T_{4j} - T_{1j}}{\Delta x_{O1O4}} \right) + \eta S_{j+1} H_{j+1} \right) \quad (12)$$

где  $j$  - номер шага в расчете деформированного и температурного состояния (“ $j$  - ое положение деформируемого сектора ABCD при прохождении очага деформации”);

$Vol_{ABC}$  - объем элемента ABC ;

$c$  - теплоемкость;  $\rho$  - плотность;  $\lambda$  - коэффициент теплопроводности деформируемого материала;

$\Delta_{oi oj}$  - расстояние между центрами тяжести элементов  $i, j$ ;

$\Delta y_{AC'}$  - длина проекции стороны элемента на направление, перпендикулярное линии соединяющей центры тяжести соседних элементов;

$T_{kj}$  - температура элемента  $k$  на шаге  $j$ ;

$\eta, S_{j+1}, H_{j+1}$  - выражение для учета тепловыделения от деформации,

$S_{j+1}$  - интенсивность девиатора напряжений,

$H_{j+1}$  интенсивность девиатора деформаций (оба значения находятся из уравнения (4));

$\eta$  - коэффициент пересчета механической работы в тепло.

Разупрочнение в междеформационной паузе учитываем по формуле (1). Значение доли рекристаллизованного объема  $X$  находим по формуле Аврами. Алгоритм компьютерной реализации математической модели представлен на (рис. 5).

**В четвертой главе** на основе разработанной конечно-элементной модели горячей раскатки кольца исследовано влияние режимов деформирования, температуры нагрева заготовки, степени локальных обжатий по проходам и длительности междеформационных пауз на величину накопленной за весь цикл раскатки степени деформации и изменение исходной температуры заготовки. Разработаны рекомендации по выбору величины подачи приводного валка и его скорости вращения, определяющих время междеформационных пауз и обеспечивающих получение в заготовке расчетных значений накопленной деформацией перед окончательной термообработкой. Приведены результаты экспериментальных исследований.

В начале главы на основе анализа работ В.А Костышева и И.Л. Шитарева проанализированы стадии раскатки, кольцевых заготовок и приведены соответствующие им скорости вращения валка и степени локальных обжатий, применяемые в существующем технологическом процессе.

Так на первой стадии деформирования происходит сбивание огранки и выведение разностенности кольцевой заготовки. Обжатия при этом составляют 0,1...0,5 мм/об., и увеличиваются по мере устранения геометрических несовершенств кольца. Скорость раскатки на данной стадии задается в пределах 0,5...1,0 м/с.

После устранения разностенности процесс раскатки переходит во вторую стадию. Здесь деформирование осуществляется с максимально возможными скоростями до 3 м/с и обжатиями до 5,0 мм/об. Чтобы обеспечить заданный температурный интервал деформирования и высокие значения накопленной деформации.

Третья стадия раскатки характеризуется применением малых обжатий от 0,05 мм/об до 0,2 мм/об. Это необходимо для обеспечения точной докатки профиля и диаметральных размеров кольца. Скорость вращения приводного валка при этом находится в пределах 0,5... 1,0 м/с.

Однако, как отмечалось выше, данные технологические режимы не обеспечивают однородной макроструктуры и требуемого уровня механических свойств.

В связи с этим для определенных технологических параметров деформирования, обеспечивающих заданные значения накопленной деформации проведено моделиро-

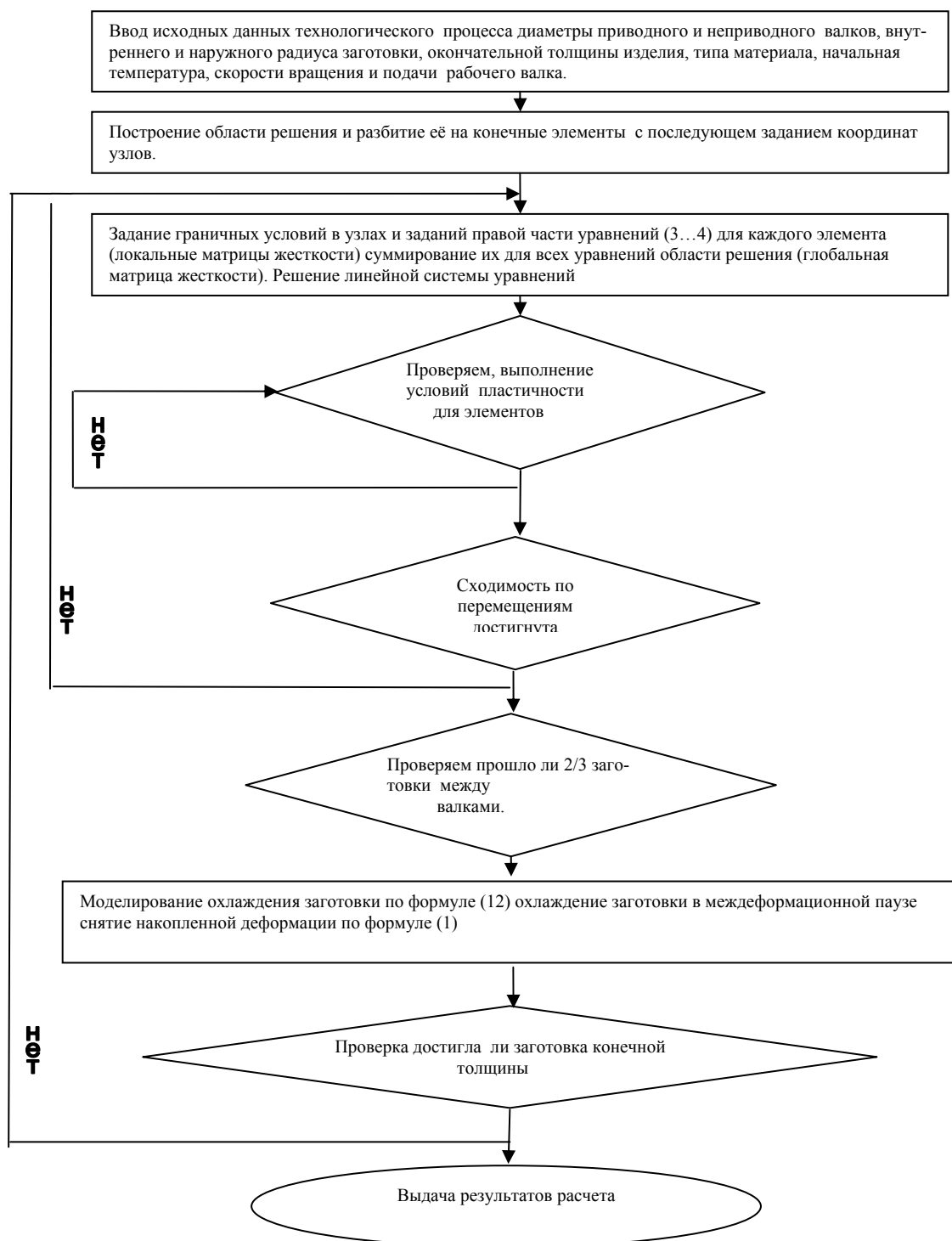


Рис. 5 Алгоритм реализации математической модели

вание процесса раскатки кольца из заготовки диаметром 1000 мм и толщиной 50 мм общее обжатие составило 30 %. На каждой стадии раскатки моделировалось распределение температуры и накопленной деформации изучалось влияние на неё междеформационных пауз. На рис 6 в качестве примера представлен график изменения величины накопленной деформации на протяжении процесса раскатки.

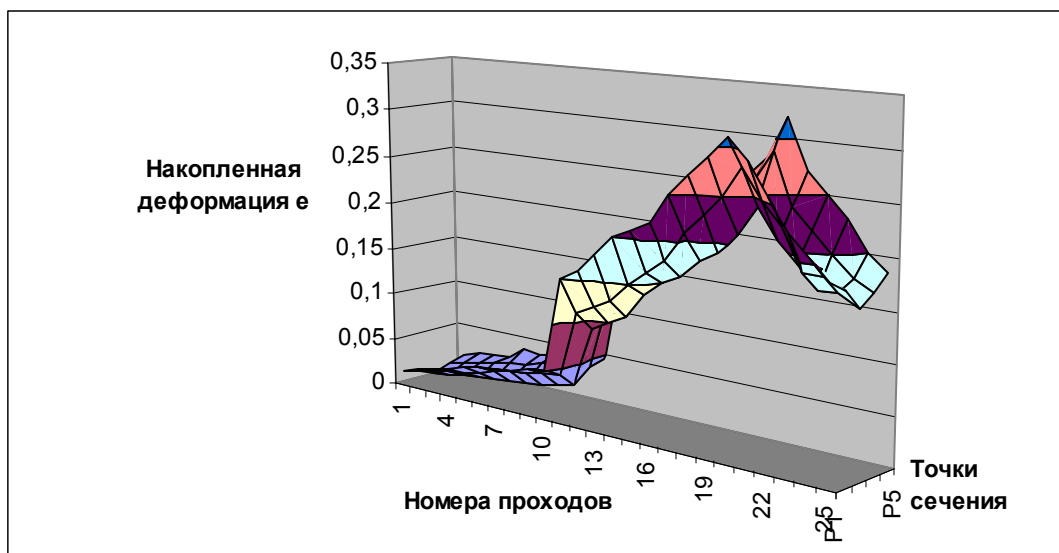


Рис. 6 Распределение накопленной деформации по проходам за весь цикл раскатки.

Параметры раскатки: первая стадия скорость вращения вала 0,5 м\с обжатия 0,3 мм\об  
 вторая стадия скорость вращения вала 1,5 м\с обжатия 2,5 мм\об третья стадия  
 скорость вращения вала 1,0 м\с обжатиями 0,2 мм\об.

В результате проведенного моделирования определены для трех стадий раскатки оптимальные значения, скоростей деформирующего инструмента увеличены подачи приводного вала обеспечивающие получение требуемой степени накопленной деформации перед окончательной термообработкой кольца.

Одновременно осуществлялось моделирование температурного поля заготовки в зависимости от скорости вращения вала и величины обжатия по проходам (рис. 7) что позволило рассчитать количество и продолжительность междеформационных пауз, обеспечивающих температуру горячей раскатки в заданном интервале (1160 – 960 С<sup>0</sup>).

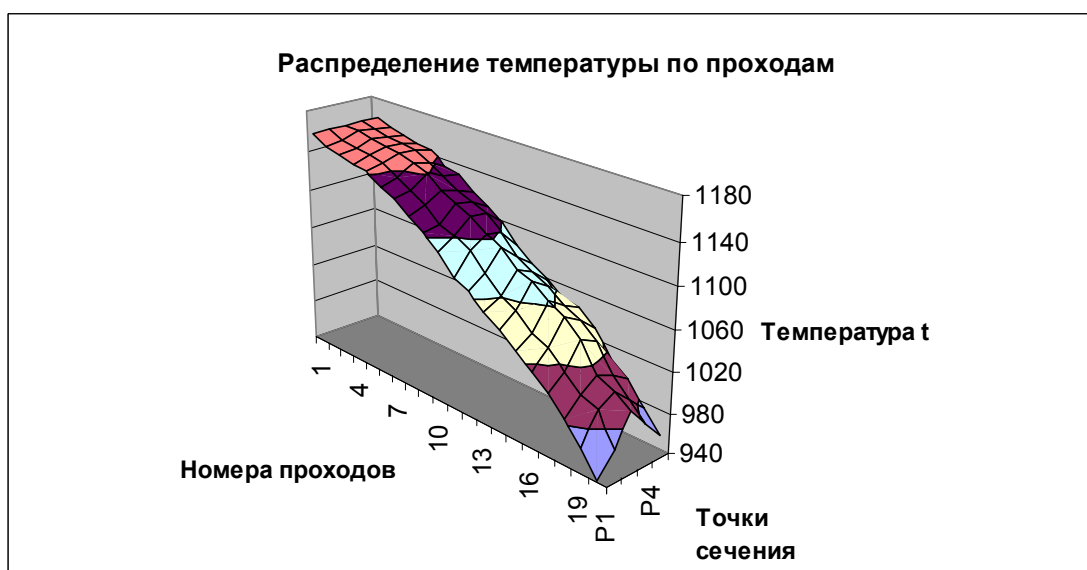


Рис. 7 Распределение накопленной деформации по проходам за весь цикл раскатки. Параметры раскатки аналогичны приведенным на рис. 6

Наряду с моделированием проведено исследование теплового поля в очаге деформации с помощью тепловизора ThermaCAM P65 полученные результаты

представлены на (рис 8). Сравнение, температур на входе в очаг деформации и выходе из него, установленных как с помощью моделирования и так с использованием тепловизора, представлено на (рис. 9). Как видно из графика расхождение между значениями температур найденных в процессе моделирования и при помощи тепловизора составляет  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ , что подтверждает адекватность результатов моделирования.

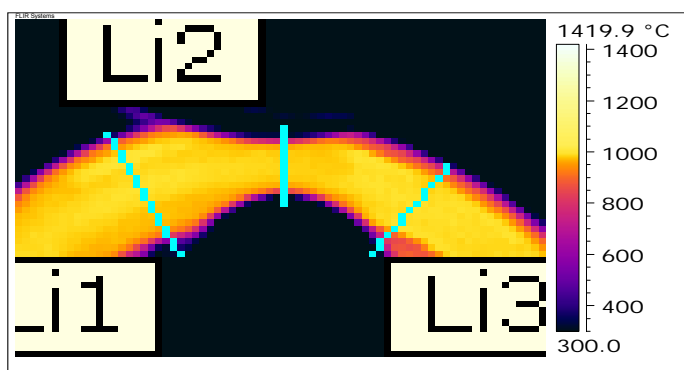


Рис. 8 Съемка с тепловизора ThermoCAM P65

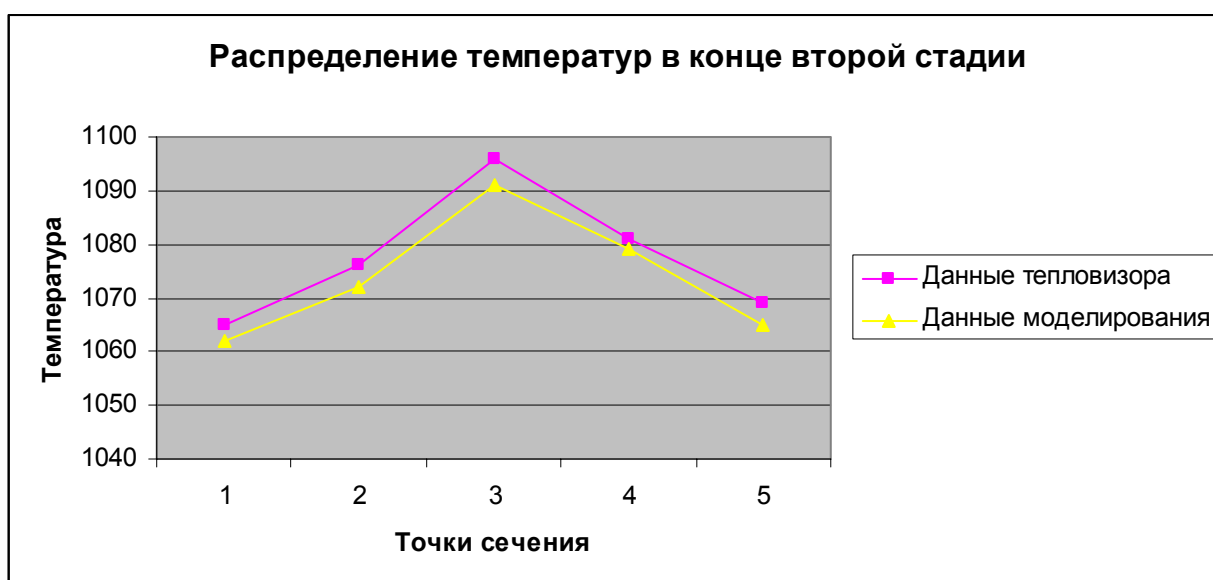


Рис 9 Распределение температуры в конце второй стадии раскатки

В заключительном разделе главы представлены результаты опытно-промышленной проверки, разработаны на основе моделирования технологические рекомендации при горячей раскатке кольца диаметром 1000 мм и толщиной 50 мм из сплава ХН68ВМТЮК-ВД.

Раскатка колец осуществляется как по стандартной т.е существующей на производстве технологии, так и по режимам регламентирующим величину локальных обжатий и продолжительность междеформационных пауз, (т.е подачу и скорость вращения приводного вала) в соответствии с данными моделирования. Это позволило на заключительной стадии раскатки получить в кольцевой заготовке расчетную степень накопленной деформации.

После раскатки кольца изготовленные по обоим вариантам подвергались отжигу при температуре  $1140\text{ }^{\circ}\text{C}$  в течение 40 минут с последующим охлаждением на

воздухе. После термообработки из кольцевых заготовок вырезались образцы для сравнительных испытаний механических свойств и макроструктуры. Полученные данные представлены в таблице 1 и на рисунке 10.

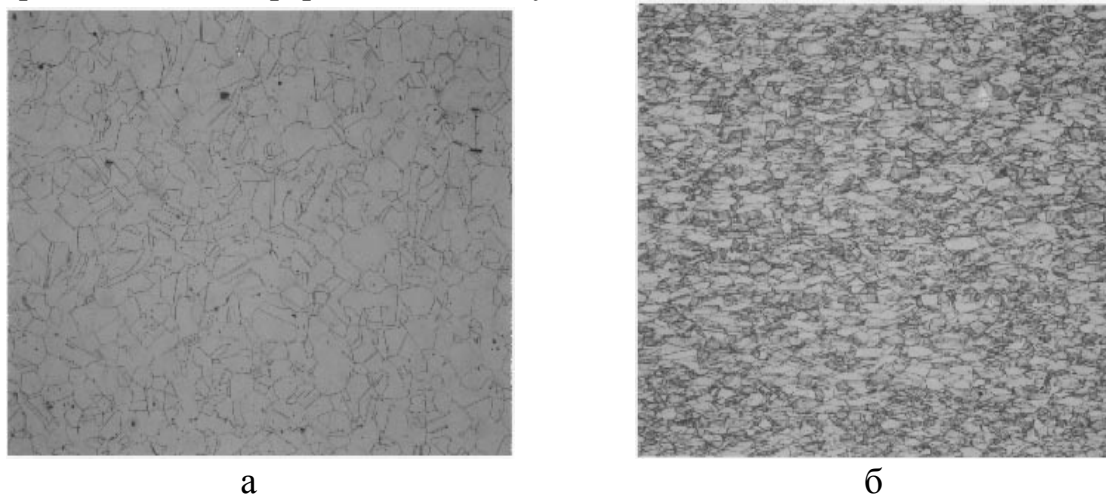
Таблица 1

*Сравнение механические свойства колец,  
изготовленных по стандартной технологии и разработанным режимам*

Материал	Вариант изготовления	Механические свойства			
		$\sigma_B$ МПа	$\sigma_{0,2}$ МПа	$\delta$ %	$\psi$ %
ХН45ВМТЮБР-ИД	Стандартная технология	950	650	15,8	26
	Раскатка по разработанным режимам	1045	715	20,0	31

Регулирование междеформационных пауз позволяет повысить такие важнейшие механические свойства как предел пластичности и предел прочности на 50 – 65 МПа и тем самым увеличить долговечность всего двигателя.

Сравнение образцов макроструктуры (рис. 10) взятых в зоне где деформации имеют наименьшее значение деформацией показывают что структура при способе с регулированием междеформационных пауз стала значительно более мелкозернистой.



*Рис 10 Образцы макроструктуры взятые в одном и том же месте кольца:  
а – без регулирования междеформационных пауз;  
б – с регулированием междеформационных пауз.*

Как следует из экспериментальных данных кольца изготовленные по разработанным режимам имеют более высокие значения механических свойств и мелкозернистую макроструктуру.

## **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

1. Разработана математическая конечно-элементная модель горячей раскатки колец ГТД с учетом дробности деформации. Данная модель позволяет находить температуру, степень накопленной деформации и учитывать влияние эти параметры локальных обжатию междудеформационных пауз.

2. Для сплавов ХН68ВМТЮК-ВД и ХН45ВМТЮБР-ИД установлены необходимые для моделирования закономерности изменения доли рекристаллизованного объема кольцевой заготовки в зависимости от температуры раскатки степени деформации и продолжительности междудеформационной паузы..

3. Проведение моделирования процесса горячей раскатки позволило установить на каждой стадии формообразования значения температуры нагрева, степени локальных обжатию и продолжительности междудеформационных пауз, необходимые для получения в кольцевой заготовке расчетной величины накопленной деформации перед окончательной термообработкой..

4. Сравнение значений степени накопленной деформации за весь цикл раскатки, полученной на основе моделирования и определенной экспериментальным путем полностью подтверждают адекватность разработанной конечно-элементной модели.

5. В целом на основе метаматематического моделирования разработаны научно-обоснованные технологические режимы горячей раскатки с регламентируемыми значениями температуры деформирования, скорости вращения и величины подачи приводного вала, обеспечивающие однородность макроструктуры и повышение прочностных свойств кольцевых деталей ГТД на 8 – 10 % а пластических на 15 – 21%.

### **Основное содержание диссертации опубликовано**

#### *в изданиях рекомендованных Высшей аттестационной комиссией*

1. Гречников, Ф.В. Качественное описание математической модели для процесса деформации при прямоугольной раскатки колец [Текст] /Е.В. Арышенский, Э.Д. Беглов, Ф.В. Гречников // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. - № 4. – 2006. – С. 1121 – 1124.

2. Гречников, Ф.В. Конечно-элементная модель расчета величины накопленной деформации в процессе горячей раскатки колец [Текст]/ Е.В. Арышенский, Э.Д. Беглов, Ф.В. Гречников // Известия Самарского научного центра Российской академии наук - №3. – 2009. - С. 230 – 236.

#### *в других изданиях*

3. Арышенский, Е. В. Математическая модель раскатки колец [Текст] / Е.В. Арышенский, Э.Д. Беглов, В.А. Костышев// Сборник трудов всероссийской молодежной научной конференции с международным участием, посвященной 100-летию академика С.П. Королева, 65 – летию КуАИ-СГАУ и 50-летию со дня запуска искусственного спутника земли” – Самара, 2007. - С. 174.

4. Арышенский, Е.В. Улучшение структуры колец газотурбинных двигателей путем контроля над степенью накопленной деформации в процессе раскатки [Текст] / Е.В. Арышенский, Э.Д. Беглов, В.А. Костышев // материалы X II Международной научной конференции посвященной памяти генерального конструктора ракетно-космических систем академика М.Ф. Решетнева”. – Красноярск, 2008. – С 189 – 190.

5. Арышенский, Е.В. Изучение и совершенствование технологического процесса раскатки колец ГТД с помощью конечно-элементной модели [Текст] / Е.В. Арышенский, Э.Д. Беглов, Ф.В. Гречников, // Сборник материалов всероссийской научно-технической конференции студентов Студенческая весна 2008: «Машиностроительные технологии», посвященной 140-летию высшего технологического образования в МВТУ им. Н.Э. Баумана – Москва, 2008. - С. 81.

6. Гречников, Ф.В. Влияние междеформационных пауз на разупрочнение колец ГТД [Текст] / Арышенский Е.В ,Ф.В. Гречников. [и. др] // Труды 3 – й Международной научно-технической конференции металлофизика, механика материалов, наноструктур и процессов деформирования Металлодеформ – 2009. – Самара, 2009. – С 96 – 102.