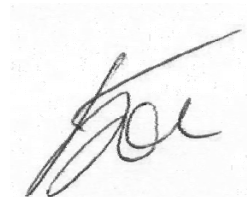


На правах рукописи



Болотеин Алексей Николаевич

**РАСЧЁТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ОСТАТОЧНЫХ
НАПРЯЖЕНИЙ НА ОСНОВЕ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЙ МОДЕЛИ
ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ**

Специальности: 05.02.08 – Технология машиностроения,
05.02.07 – Технология и оборудование механической и
физико-технической обработки

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Рыбинск – 2014

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьёва».

Научный руководитель:

доктор технических наук, профессор БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ Вячеслав Феокистович.

Научный консультант:

доктор технических наук, профессор НЕПОМИЛУЕВ Валерий Васильевич.

Официальные оппоненты:

МУХИН Виктор Сергеевич, доктор технических наук, профессор, кафедра «Технология машиностроения», ФГБОУ ВПО «Уфимский государственный авиационный технический университет», профессор;

БУКАТЫЙ Алексей Станиславович, кандидат технических наук, кафедра «Технология машиностроения», ФГБОУ ВПО «Ярославский государственный технический университет», старший преподаватель.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Донской государственный технический университет».

Защита диссертации состоится «24» декабря 2014 г. в 10 часов на заседании диссертационного совета Д 212.210.01 в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьёва» по адресу: 152934, г. Рыбинск Ярославской области, ул. Пушкина, 53, ауд. Г-237.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьёва».

Автореферат разослан «23» октября 2014 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
канд. техн. наук



Конюхов Борис Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Несмотря на большое количество работ в области исследования качества поверхностного слоя и анализа напряжённо-деформированного состояния, по-прежнему недостаточно изучена проблема перераспределения остаточных напряжений в поверхностном слое деталей сложной пространственной формы, которое приводит к их короблению и к нарушению геометрической точности. Кроме того, многие из существующих в настоящее время методов расчёта остаточных напряжений и деформаций сложны для эффективного использования в производственных условиях или имеют ряд существенных ограничений. Решением данной проблемы может стать разработка новых расчётных методов, основанных на использовании современных систем компьютерного моделирования и численного анализа, с соответствующим научным обобщением известных теоретических и практических разработок в данной области. Одним из этих численных методов является метод конечных элементов (МКЭ), применение которого позволяет с минимальными затратами времени добиваться нужных результатов. С его помощью можно моделировать процесс резания, осуществлять расчёт напряжений, возникающих в деталях, выполнять их предварительную оценку, прогнозировать возможные деформации, анализировать геометрическую точность деталей и их пригодность для сборки и эксплуатации, разрабатывать рекомендации по назначению технологических условий обработки. Причём всё это можно выполнить ещё на этапе технологической подготовки производства до того, как детали будут изготовлены.

В диссертационной работе автор рассматривает научно-обоснованный подход к созданию такого расчётного метода и предлагает его использование для анализа напряженного состояния сложных пространственных деталей и управления им путем изменения технологических условий обработки. Его применение на производстве позволит сократить затраты на изготовление изделий и повысить их качество.

Цель работы. Исследование остаточных напряжений и геометрической точности деталей с применением компьютерного моделирования по методу конечных элементов.

Для достижения цели в работе решены следующие задачи:

– проанализированы литературные источники, рассматривающие вопросы расчёта и оценки напряженно-деформированного состояния высокоточных деталей после механической обработки, в том числе с использованием средств компьютерного моделирования;

– разработана компьютерная численная модель процесса резания на основе метода конечных элементов, учитывающая температурно-зависимые физико-механические свойства материалов детали и режущего инструмента;

– разработан метод компьютерного моделирования процесса формирования в поверхностном слое деталей остаточных напряжений с учётом особенностей геометрии деталей, их материала и заданных технологических условий обработки;

– разработан алгоритм для расчёта возможных деформаций деталей после их механической обработки с заданными технологическими условиями;

– предложена комплексная методика компьютерного моделирования геометрических отклонений формы и размеров высокоточных маложестких деталей на основе результатов компьютерного моделирования процесса резания.

Научная новизна заключается в разработке на основе метода конечных элементов теоретических положений (математических моделей, расчётных схем, алгоритмов), необходимых для моделирования процесса механической обработки резанием, а также для расчёта поля распределения остаточных напряжений в поверхностном слое деталей и деформации деталей после обработки с учётом их геометрических особенностей и физико-механических характеристик материала.

Практическая значимость работы. Разработана методика компьютерного моделирования геометрических отклонений формы и размеров высокоточных маложестких деталей по результатам моделирования процесса резания. Эта методика при внедрении в производство позволяет повысить эффективность разработки технологических процессов изготовления деталей за счет возможности прогнозирования их поведения в процессе сборки и эксплуатации. Разработанные алгоритмы и компьютерные программы обеспечивают технолога необходимыми прикладными инструментами для назначения технологических условий обработки.

Основные положения, выносимые на защиту:

– компьютерная численная модель процесса резания на основе метода конечных элементов, учитывающая температурно-зависимые физико-механические свойства материалов детали и режущего инструмента;

– метод компьютерного моделирования процесса формирования в поверхностном слое деталей остаточных напряжений с учётом особенностей геометрии деталей, их материала и заданных технологических условий обработки;

– алгоритм для расчёта возможных деформаций деталей после их механической обработки с заданными технологическими условиями;

– комплексная методика компьютерного моделирования геометрических отклонений формы и размеров высокоточных маложестких деталей на основе результатов компьютерного моделирования процесса резания.

Степень достоверности и апробация работы. Достоверность научных результатов подтверждается проверкой адекватности выявленных закономерностей, разработанных моделей и расчётных схем путем проведения экспериментальных исследований, а также использованием сертифицированного программного обеспечения для выполнения расчётов. Полученные результаты не противоречат данным других исследований. Основные положения и результаты выполненной работы докладывались и обсуждались на конференциях: Международная научно-техническая конференция «Наукоемкие технологии в машиностроении и авиадвигателестроении – 2012», Российская научно-техническая конференция «Проблемы определения технологических условий обработки по заданным показателям качества изделия – 2005», Международная молодежная научная конференция XXX Гагаринские чтения – 2006, Международная научная конференция «XII Туполевские чтения – 2008», Всероссийская конференция «Наукоемкие технологии в машиностроении – 2011».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 научных работ в различных журналах и сборниках научных трудов, в том числе 2 в изданиях, рекомендованных ВАК РФ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, общих выводов по работе, списка использованных источников и приложения. Объем работы – 188 страниц текста, включающего 103 рисунка, 23 таблицы, список использованных источников из 73 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность проблемы, решаемой в диссертационной работе, дана общая характеристика направления исследований.

В первой главе рассматривается современное состояние вопроса по исследуемой проблеме. Анализируются имеющиеся теоретические и практические разработки и принятые в них ограничения. Оценивается значимость и необходимость решения имеющихся проблем. Приводится анализ литературных источников по состоянию рассматриваемой научной проблемы и производственных сведений по объекту исследования. Вопросами, связанными с обеспечением эксплуатационных свойств изделий, параметров качества поверхностного слоя деталей, с определением технологических условий обработки, а также компьютерным и математическим моделированием процесса резания, занимались отечественные и зарубежные учёные: А. М. Дальский, И. А. Биргер, В. Ф. Безъязычный, С. А. Букатый, В. А. Остафьев, В. И. Бутенко, А. П. Бабищев, А. Г. Суслов, А. Д. Макаров, В. С. Мухин, А. И. Кондаков, Б. А. Кравченко, Ю. Н. Вивденко, А. Н. Овсеенко, А. И. Промптов, С. К. Каргапольцев, А. В. Киричек, М. А. Тамаркин, В. П. Смоленцев и другие.

Анализ литературных источников позволил установить, что представляется целесообразным управлять величиной остаточных деформаций и напряжений с помощью режимов резания, то есть посредством изменения скорости резания, подачи и глубины резания. Основным преимуществом использования этих параметров, кроме того, что они оказывают наибольшее влияние на формирование напряжённо-деформированного состояния детали, является простота их изменения технологом, что позволяет использовать уже существующий технологический процесс, внося в него минимальные корректировки. На основе проведённого анализа сформулирована цель исследования, составлен перечень задач, которые необходимо решить для её достижения, рассмотрены возможные способы их решения, в том числе с применением численного моделирования по методу конечных элементов.

Во второй главе приводится обоснование использования в решении проблем управления качеством поверхностного слоя численных методов анализа. Предлагается использовать метод конечных элементов и анализируются его возможности по моделированию процесса резания, возможности работы с требуемыми физическими величинами. Приводятся основные теоретические положения метода конечных элементов, математические зависимости, необходимые для решения задач, связанных с упругими и пластическими деформациями, а

также с формированием остаточных напряжений. Так, из многих научных работ известна следующая зависимость:

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon^y\} + \{\varepsilon^m\} + \{\varepsilon^{nl}\}, \quad (1)$$

где $\{\varepsilon\}$, $\{\varepsilon^y\}$, $\{\varepsilon^m\}$, $\{\varepsilon^{nl}\}$ – векторы суммарной, упругой, температурной и пластической деформации, соответственно.

С учётом особенностей выполнения компьютерного анализа по методу конечных элементов можно записать компоненты (1) следующим образом:

$$\{\varepsilon^y\} = \{\sigma\} [D_y]^{-1}, \quad \{\varepsilon^m\} = \Delta T [\alpha_x \ \alpha_y \ \alpha_z \ 0 \ 0 \ 0]^T, \quad \{d\varepsilon^{nl}\} = \{d\sigma\} [D_{nl}]^{-1}, \quad (2)$$

где α_x , α_y , α_z – коэффициенты температурного расширения материала в направлении соответствующих осей координат; ΔT – разница температур в интересующей точке и температуры, при которой деформации отсутствуют; $\{\sigma\}$ – тензор напряжений, $[D_y]$ – матрица упругости, $[D_{nl}]$ – матрица пластичности.

Используя метод конечных элементов, можно вычислить компоненты (2) и рассчитать остаточные напряжения $\{\sigma^{ocm}\}$ и деформации $\{\varepsilon^{ocm}\}$:

$$\{\varepsilon^{ocm}\} = \{\varepsilon^m\} + \{\varepsilon^{nl}\}, \quad \{\sigma^{ocm}\} = \{\sigma\} - [D] \{\varepsilon^y\}. \quad (3)$$

Попытки применения метода конечных элементов для решения задач механической обработки резанием предпринимались давно. Однако существующие методы имеют ряд ограничений, которые не позволяли моделировать пластическое течение материала в зоне резания, реальные условия трения резца со стружкой, не позволяли учитывать распределение температуры в зоне резания, изменение свойств материала при разной температуре, скорость деформации. Для выполнения подобных расчетов предложен метод конечно-элементного анализа, базирующийся на алгоритме ICM (Iterative convergence method) – метод итерационной сходимости, доработанный автором для решения поставленных в работе задач. Доработка алгоритма заключается в применении других, по сравнению с известными, математических моделей процесса резания, моделей описания свойств материала, расчётных схем и дополнительных алгоритмов конечно-элементного анализа. Эти доработки позволяют анализировать возникновение остаточных напряжений с точки зрения действия как силового, так и температурного факторов процесса резания, позволяют учесть геометрию детали, неравномерность распределения припусков на обрабатываемых поверхностях, физико-механические свойства материала детали и инструмента. Появилась возможность расчёта величины остаточных деформаций деталей сложной формы.

Одним из наиболее важных этапов конечно-элементного анализа является нанесение на модель исследуемого объекта сетки конечных элементов, при этом точность расчётов зависит от правильного выбора типов и размеров элементов. Тип элемента должен соответствовать решаемой задаче с точки зрения физики процесса и иметь соответствующее математическое описание. Так, для выполнения конечноэлементного анализа процесса резания, необходимо использовать несколько элементов и моделей, ориентированных на решение конкретных задач. При выполнении расчётов в ANSYS/LS-DYNA были выбраны следующие типы элементов (таблица 1).

Таблица 1 – Рекомендуемые типы конечных элементов

Решаемая задача	Среда моделирования	Тип элемента
Определение температуры и её распределения в зоне резания	ANSYS Multiphysics	SOLID70
Расчёт сил резания, напряжений и деформаций в зоне резания	ANSYS/LS-DYNA	SOLID164
Расчёт остаточных деформаций	ANSYS Multiphysics	SOLID185

В третьей главе изложена сущность предлагаемых методов расчета. Рассмотрены расчетные схемы, алгоритм и реализация его отдельных этапов. Приводится математический и программный аппарат, модели исследуемых объектов и явлений, указываются обоснования принятых допущений и область применения методики.

Основную сложность в реализации расчетной методики имеет этап компьютерного моделирования процесса механической обработки резанием. Для его осуществления был предложен алгоритм, представленный на рисунке 1. В соответствии с этим алгоритмом расчет осуществляется следующим образом.

1) Создается конечно-элементная модель (КЭМ) зоны резания, которая включает в себя модель обрабатываемой заготовки (или её фрагмент), геометрически и физически соответствующая реальной заготовке, и модель резца в исходном положении.

2) Задаются граничные условия для расчета. Так, для температурного анализа граничными условиями являются участки отвода тепла $q_1 - q_6$ и источники тепла Q_{def} , $Q_{n.mp}$, $Q_{z.mp}$, размещённые на модели (рисунок 2, а), в соответствии с теоретической схемой их распределения (рисунок 2, б). Для выполнения силового анализа заготовка лишается возможности перемещаться – ей задаются граничные условия D_x , D_y – в виде ограничений перемещений по осям координат. Полученная в результате модель представлена на рисунке 3.

3) Выполняется расчёт, в ходе которого КЭМ инструмента перемещается вдоль заготовки, деформируя сетку элементов и придавая узлам сетки определённую скорость. Перемещение продолжается до тех пор, пока не возникнет пластическая деформация материала исследуемой детали (Цикл 1). Моделируется формирование стружки.

4) Определяется величина деформации заготовки путём интегрирования скорости деформации в соответствующие моменты времени вдоль линий её действия.

5) Вычисляется температура на основе внутренней работы и работы сил трения с учётом теплофизических свойств материала.

6) Выполняется моделирование процесса отделения стружки и возникновения остаточных напряжений. Расчёты повторяются до тех пор, пока не будет получено окончательное решение (Цикл 2).

7) Используются поля остаточных напряжений в качестве нагрузки для моделирования явления остаточной деформации.

8) Выполняется построение деформированной модели детали. Анализируются возникшие отклонения формы и расположения поверхностей.

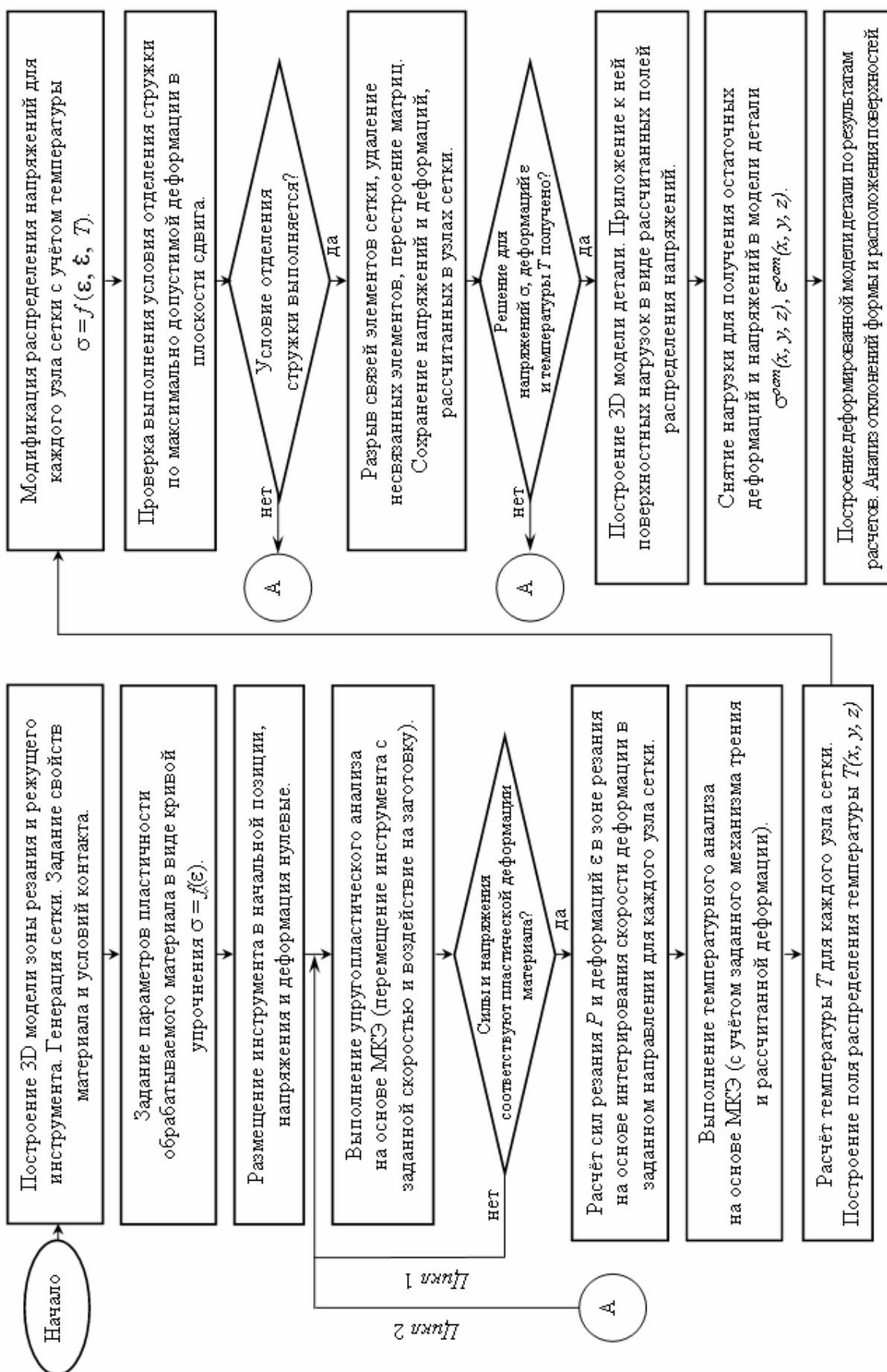


Рисунок 1 – Алгоритм расчёта остаточных напряжений и деформаций детали по методу конечных элементов

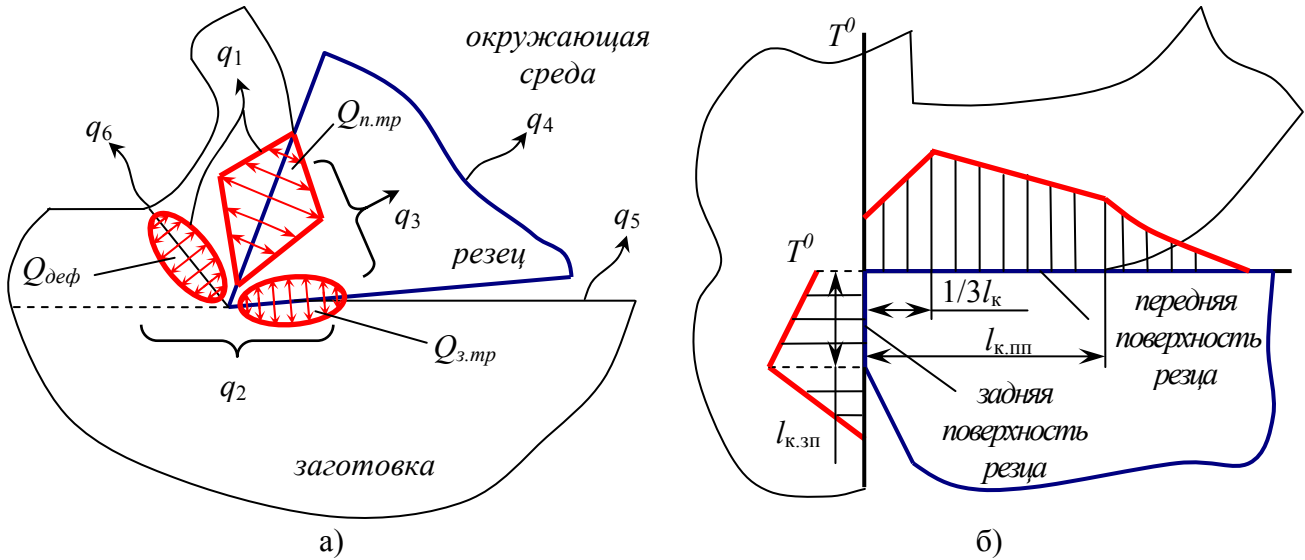


Рисунок 2 – Расчётные схемы для формирования математической модели температурного воздействия на заготовку в зоне резания: а) схема расположения источников тепла в зоне резания: $Q_{деф}$ – теплота, образующаяся из-за наличия внутреннего трения между частицами деформируемого при обработке металла; $Q_{н.тр}$ – теплота, образующаяся при внешнем трении срезаемой стружки о переднюю поверхность резца; $Q_{з.тр}$ – теплота, образующаяся при внешнем трении поверхности резания и обработанной поверхности о задние поверхности резца; б) схема распределения температуры на передней (пп) и задней (зп) поверхности резца на участке контакта с заготовкой l_k , $q_1, q_2, q_3, q_4, q_5, q_6$ – направления отвода тепла

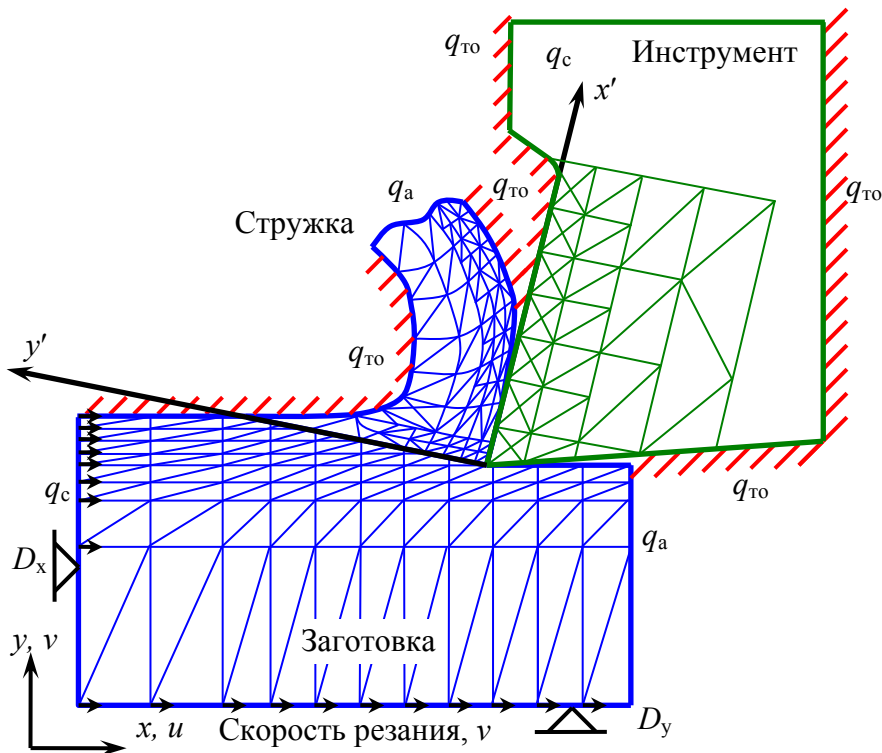


Рисунок 3 – Конечно-элементная модель процесса формирования стружки: x, y, u, v – узловые координаты, $q_{то}$ – границы теплоотвода, q_c – границы с окружающей средой, q_a – адиабатическая граница материала, D_x, D_y – ограничение перемещений по осям системы координат

Полученные результаты в виде поля распределения остаточных напряжений и деформаций анализируются, и принимается решение о возможности использования назначенных технологических условий для выполнения операции или о необходимости их изменения и выполнении повторного расчёта.

В моделировании процесса механической обработки резанием особое место занимает описание поведения материала заготовки при приложении к ней как силовых, так и температурных нагрузок, с учётом физико-механических свойств обрабатываемого материала. Наиболее полно модель пластического поведения обрабатываемого материала может быть представлена с помощью математического описания кривой течения, т. е. задания уравнения состояния, которое позволяет связать между собой условия деформации и величину возникающих при этом напряжений. В диссертационной работе используется модель Зерилли–Армстронга, которая представляет собой модель пластичности и хорошо описана в литературе. Эту модель автор использовал для анализа процессов формообразования металлов при больших деформациях, с учётом скорости деформации и температуры. В результате получена конечно-элементная модель применимая к условиям работы. В основе модели лежит уравнение (4):

$$\sigma = C_1 + \left[C_2 \varepsilon^{\frac{1}{2}} \cdot e^{(-C_3 + C_4 \cdot \ln \dot{\varepsilon})T} + C_5 \right] \cdot \frac{G(T)}{G(T_0)}, \quad (4)$$

где $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, n$ – константы математической модели, определяемые для каждого материала на основе справочных данных или экспериментально; ε – величина пластической деформации, $\dot{\varepsilon}$ – скорость пластической деформации; T – температура, до которой нагрет материал; T_0 – температура (при которой получены данные, 20 °C); G – модуль сдвига материала.

На основе разработанных математических моделей и алгоритмов были проведены расчеты для различных материалов и технологических условий, с целью определения сил и температур в зоне резания, напряжений и деформаций, остаточных напряжений в поверхностном слое и т. д. Учитывалось влияние геометрии детали и её физико-механических свойств, а также геометрии режущего инструмента. На рисунке 4 приводится пример результатов расчета поля распределения температуры при моделировании процесса токарной обработки.

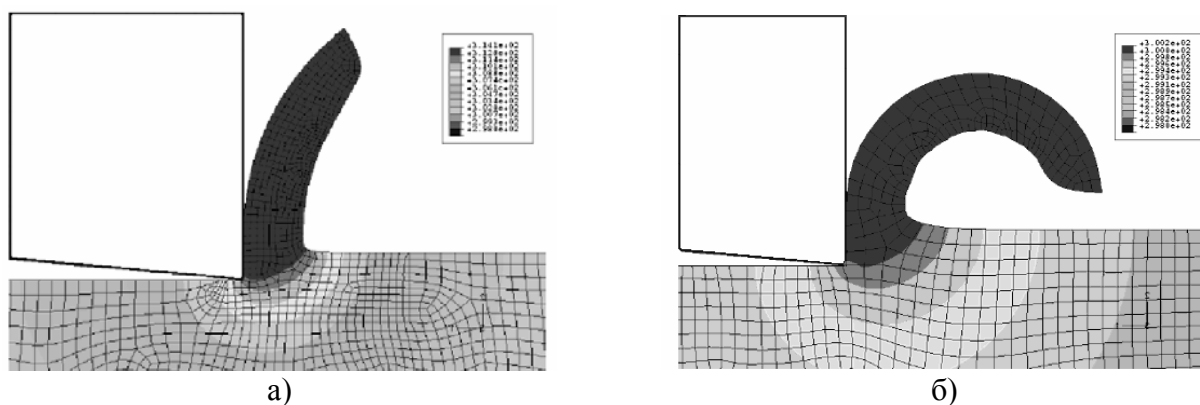


Рисунок 4 – Пример результатов расчета поля распределения температуры при моделировании процесса механической обработки резанием (инструментальный материал T15K6, обрабатываемый материал Сталь 45, подача 0,05 мм/об, скорость резания 60 м/мин, $\varphi=45^\circ$, $\varphi_1=20^\circ$, $\alpha=10^\circ$, $\gamma=18^\circ$, $r=0,05$ мм): а) глубина резания 0,1 мм, б) глубина резания 0,5 мм

Четвёртая глава посвящена подтверждению адекватности и применимости предложенной методики для решения практических задач, возникающих при производстве высокоточных деталей.

Оценка адекватности методики производилась путём сравнения результатов натурального эксперимента с результатами, полученными с помощью метода конечных элементов. Сравнение производилось по силам резания и по величине остаточных напряжений в поверхностном слое деталей-образцов. Например, один из образцов был обработан точением при следующих технологических условиях: $\varphi = 45^\circ$, $\varphi_1 = 20^\circ$, $\alpha = 10^\circ$, $\gamma = 18^\circ$, $r = 0,2 \dots 0,4$ мм, $S = 0,1$ мм/об, $t = 0,2$ мм, $n = 1575$ об/мин. Для этих же условий был произведён конечно-элементный анализ. На рисунке 5 представлены соответствующие графики изменения величины сил резания во времени, полученные разными методами. На рисунке 6 аналогичным образом получены эпюры для остаточных напряжений.

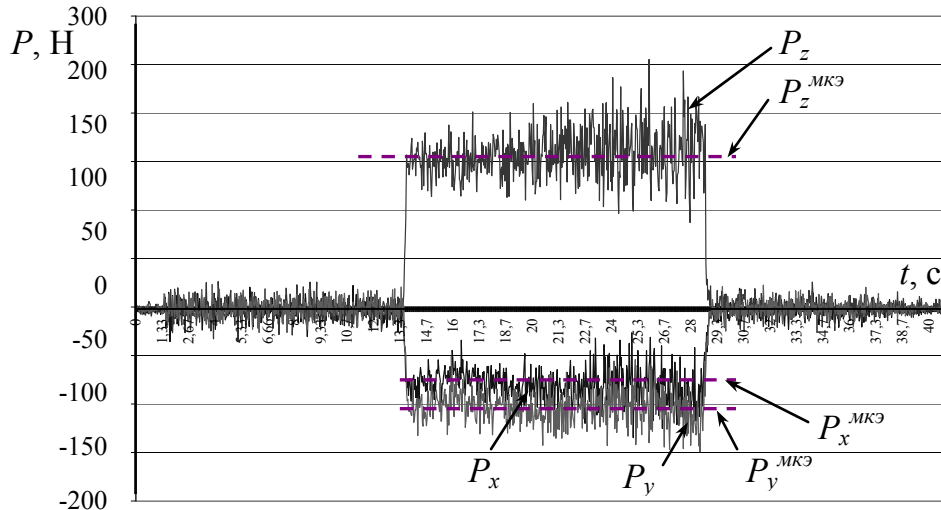


Рисунок 5 – Сопоставление сил резания при чистовом точении образца, полученных экспериментально – P_x , P_y , P_z и методом конечноэлементного анализа $P_x^{МКЭ}$, $P_y^{МКЭ}$, $P_z^{МКЭ}$

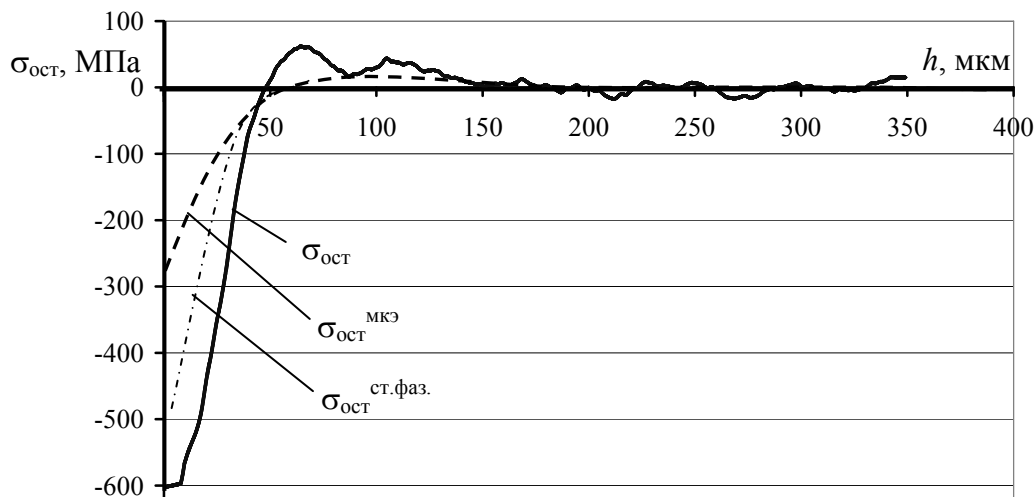


Рисунок 6 – Сопоставление эпюр распределения остаточных напряжений после чистового точения образца: полученных экспериментально – $\sigma_{ост}$, методом конечно-элементного анализа $\sigma_{ост}^{МКЭ}$, с учетом структурно-фазовых изменений $\sigma_{ост}^{ст.фаз.}$

Расчёты позволили подтвердить адекватность моделей и расчётных схем для исследования процесса резания и формирования остаточных напряжений.

В пятой главе рассматривается возможность применения разработанной методики на производстве путем её интеграции в компьютерные системы автоматизированного проектирования CAD, CAM и CAE класса. Вариант внедрения

предложенных методик в компьютеризированное интегрированное производство представлен в виде структурной схемы на рисунке 7.

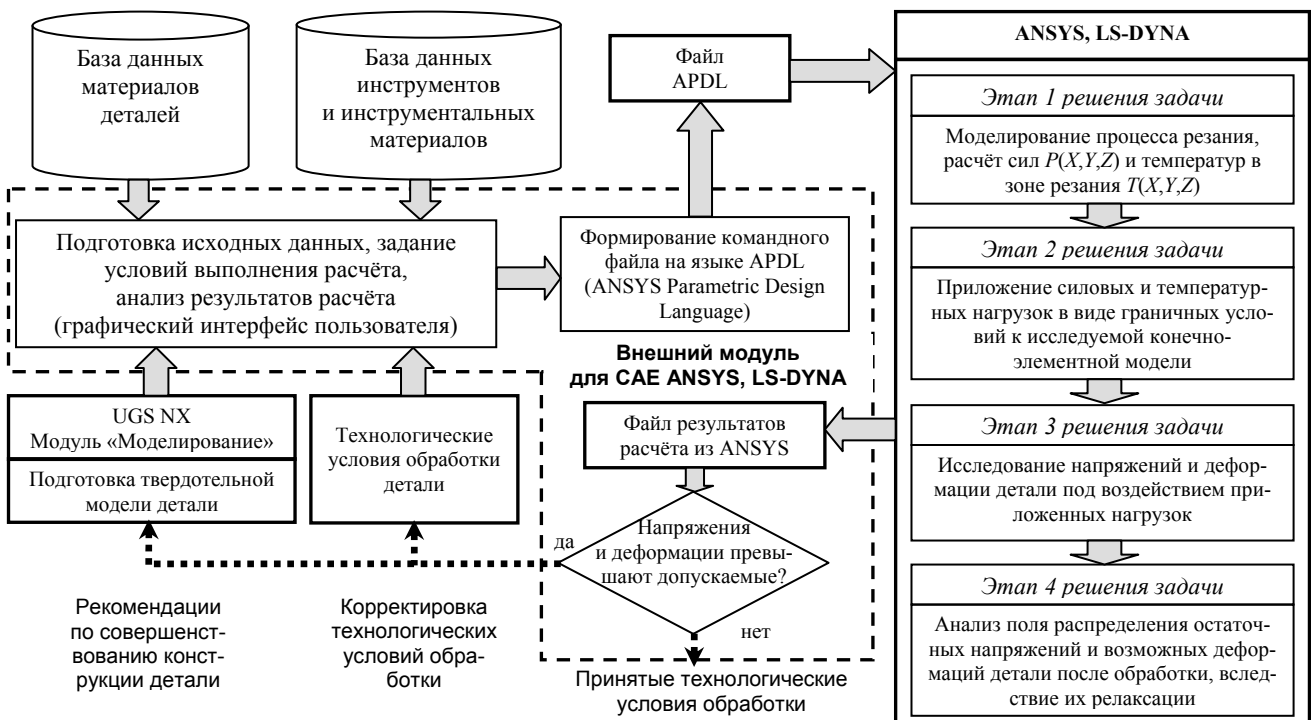


Рисунок 7 – Использование предложенной методики в интегрированных производственных CAD и CAE системах

Рассматриваются задачи по прогнозированию напряжённо-деформированного состояния деталей после механической обработки, задача по обеспечению требуемого напряжённо-деформированного состояния деталей путём управления технологическими условиями обработки.

В качестве примера практического применения предложенной методики рассматривается назначение технологических условий обработки детали Диск 11 ступени КВД ГТД Д30КУ/КП с учётом допустимой величины его остаточной деформации. На рисунке 8 представлена его конечноэлементная модель с примерами полученных результатов моделирования.

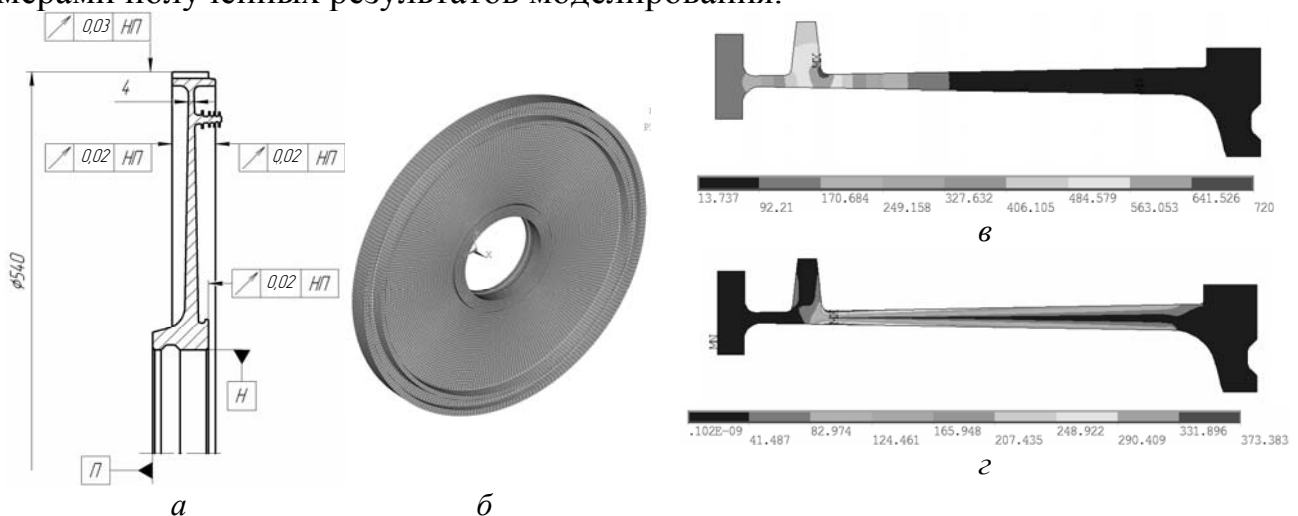


Рисунок 8 – Конечно-элементный анализ диска 11 ступени КВД ГТД Д30КУ/КП: а) требования к геометрической точности диска, б) конечноэлементная модель диска, в) расчёт поля распределения температуры, г) расчёт поля распределения напряжений

Расчёты проводились для нескольких вариантов технологических условий обработки, указанных в таблице 2. На основе результатов расчётов были спрогнозированы возможные деформации диска под действием остаточных напряжений по отдельным сечениям.

Таблица 2 – Варианты технологических условий для выполнения расчётов

Вариант условий	Технологические условия обработки						Результаты расчётов			
	Геометрия реза			Режимы резания			T^{\max} , °C	Pz^{\max} , Н	Δ_o^{\max} , мм	Δ_p^{\max} , мм
	α , °	γ , °	ϕ , °	t , мм	S , мм/об	v , мм/мин				
1	10	10	45	1	0,5	40	780	3200	0,025	0,021
2	10	12	45	0,8	0,5	20	720	2700	0,023	0,019
3	10	10	45	0,5	0,4	60	640	2400	0,017	0,010
4	10	12	45	0,5	0,25	40	560	2600	0,011	0,006

Примечание: Δ_o^{\max} и Δ_p^{\max} – наибольшее геометрическое отклонение поверхности диска в осевом и радиальном направлении, соответственно. *Варианты заданных технологических условий:* 1 – заводской вариант ТП, 2 – режимы из технологических справочников, 3 – теоретико-экспериментальные расчёты, 4 – расчёты по методу конечных элементов

Рисунок 9 иллюстрирует изменение формы полотна диска при различных технологических условиях его обработки. Результаты расчётов остаточных деформаций можно представить в виде следующих графиков (рисунок 10).

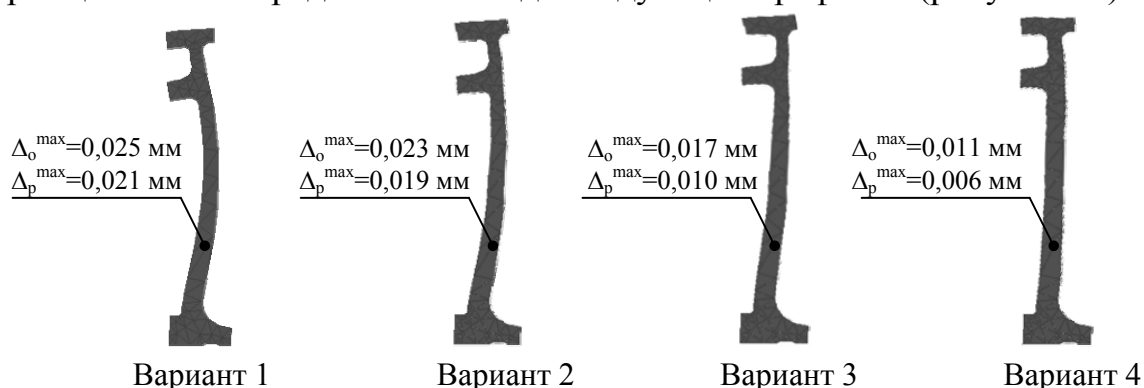


Рисунок 9 – Прогнозируемая деформация диска под действием остаточных напряжений при различных технологических условиях обработки (рисунки сделаны для наглядности с увеличенной деформацией, верить следует указанным численным значениям)

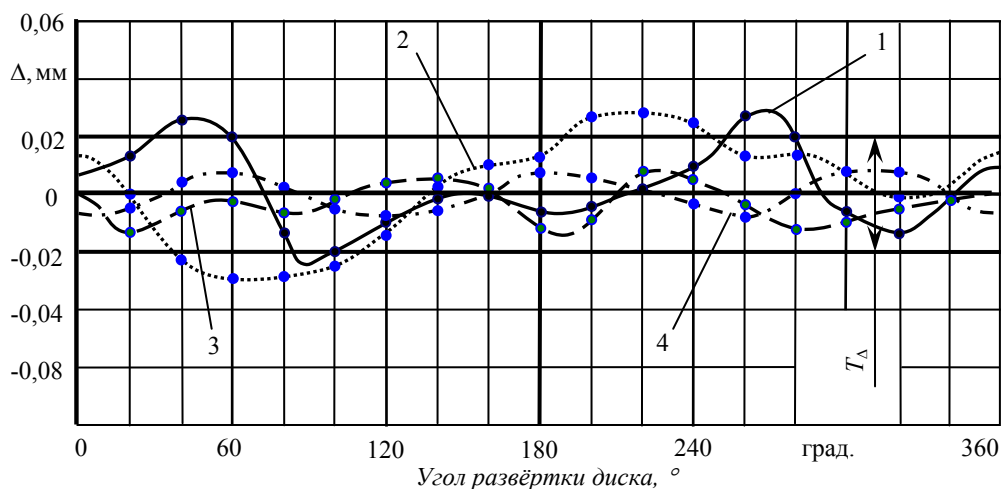


Рисунок 10 – Ожидаемая деформация диска Δ по торцу обода (торцовое биение) при технологических условиях обработки, заданных в базовом технологическом процессе (1), варианты с изменёнными (скорректированными) технологическими условиями обработки (2), (3), (4), окончательно принятый вариант (4), T_{Δ} – допускаемая деформация

На графиках обозначена величина отклонения торцевой поверхностей диска по всей поверхности тела вращения от 0 до 360 °, полученная при разных вариантах технологических условий обработки 1 – 4 (см. таблицу 2).

Как видно из рисунка 10, далеко не все режимы резания следует использовать для обработки, так как во многих случаях ожидаемые остаточные деформации сопоставимы, а иногда и превышают заданный допуск на расположение поверхностей T_{Δ} . Наименьшие отклонения ожидаются при использовании варианта 4 режимов резания из таблицы 2. Таким образом, анализируя результаты конечно-элементного анализа, можно определить наиболее подходящий вариант технологических условий обработки для маложёстких деталей.

Выполняя анализ с применением разработанной методики, путём проведения серий виртуальных экспериментов, можно получить различные зависимости, связывающие, например, величины осевых и радиальных остаточных деформаций с режимами резания (рисунок 11), что значительно упрощает их назначение при разработке технологических процессов.

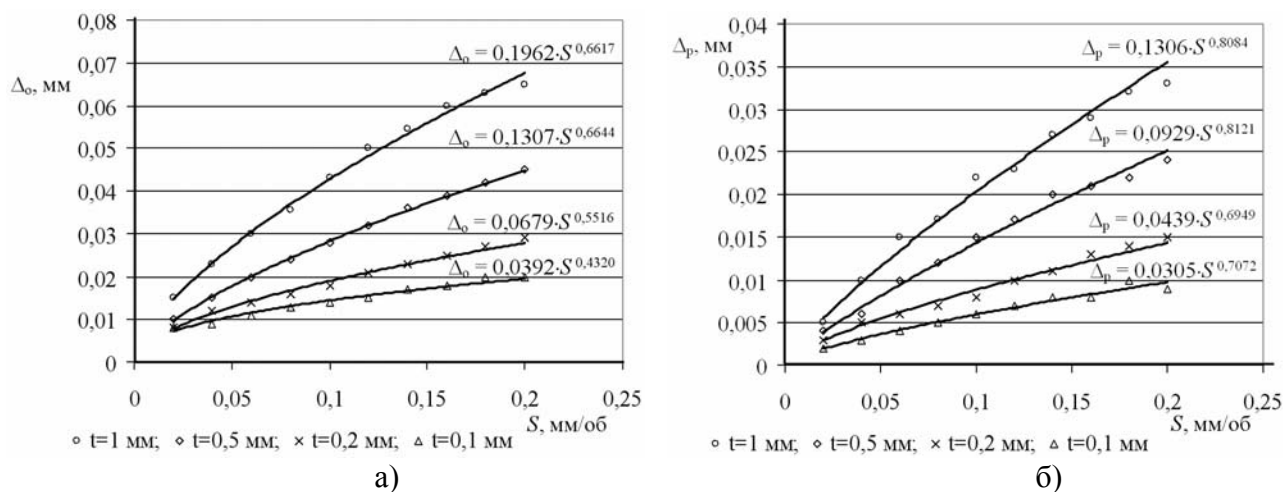


Рисунок 11 – Графики зависимости величины остаточных деформаций при чистовом точении полотна диска: а) осевых, б) радиальных при чистовом точении полотна диска ГТД от режимов резания: Δ_0 – величина осевых остаточных деформаций, мм; Δ_r – величина радиальных остаточных деформаций, мм (материал диска 18ХНВА, резец Т15К6)

Главными факторами с точки зрения оценки экономической эффективности от внедрения предложенной методики в производство являются: сокращение сроков и затрат на освоение новой техники, затрат, связанных с отработкой технологических процессов изготовления деталей и сборки изделий, повышение надёжности, долговечности и эксплуатационной пригодности изделий.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1) Результаты исследования позволили установить, что для оценки поля распределения остаточных напряжений, возникающих в деталях после механической обработки, целесообразно применение методов компьютерного моделирования и анализа процесса резания при наличии соответствующего математического и программного обеспечения.

2) Автором диссертации были проанализированы и предложены в качестве основы: конечно-элементные математические модели, описывающие процесс

механической обработки резанием и поведение материала детали с учетом его физико-механических свойств; расчётные схемы с граничными условиями, необходимые для выполнения компьютерного анализа по методу конечных элементов; алгоритмы и программы для выполнения расчетов.

3) Разработанный алгоритм при практическом применении расчетных методик в процессе проектирования технологических процессов изготовления высокоточных маложестких деталей позволяет назначать технологические условия токарной обработки и прогнозировать возможные остаточные деформации деталей при обработке их с заданными технологическими условиями.

4) Разработанная методика компьютерного моделирования возможных геометрических отклонений формы и размеров высокоточных маложестких деталей вследствие остаточных деформаций построена на основе моделирования процесса резания по методу конечных элементов.

5) Разработанное прикладное программное обеспечение для CAE-системы ANSYS/LS-DYNA, использующее предложенные модели и методики расчёта, позволяет проводить анализ поля распределения остаточных напряжений и прогнозировать величину остаточной деформации деталей с различной геометрией, изготовленных из различных материалов, с учетом назначенных технологических условий её токарной обработки.

6) Применение методов компьютерного анализа позволяет снизить затраты на материальные и трудовые ресурсы, так как реальный эксперимент заменяется виртуальным, сократить длительность технологической подготовки производства, повысить качество принимаемых технологических решений, а, следовательно, и качество выпускаемых изделий, упростить и ускорить процесс сборки изделий и их стабильность при эксплуатации.

7) Расчётами установлено, что внедрение предложенной методики в производство позволит получить эффект только для одной детали (диск 11 ступени КВД ГТД Д30КУ/КП) 57 тыс. рублей. Учитывая, что количество аналогичных деталей в производстве достигает десятки и даже сотни штук, экономический эффект может достигать нескольких миллионов рублей.

ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

1 **Болотеин, А. Н.** Применение компьютерного моделирования при назначении технологических условий обработки высокоточных деталей [Текст] / Вестник РГАТУ имени П. А. Соловьёва. – Рыбинск : РГАТУ, 2013. – №3(26), 2013. С. 104 – 108.

2 **Болотеин, А. Н.** Анализ напряжённо-деформированного состояния деталей после механической обработки средствами компьютерного моделирования [Текст] / Вестник РГАТУ имени П. А. Соловьёва. – Рыбинск : РГАТУ, 2014. – №1(28), С. 54 – 61.

Публикации в других изданиях

3 **Болотеин, А. Н.** Особенности применения компьютерного моделирования при назначении технологических условий механической обработки высо-

коточных деталей [Текст] / Международная научно-техническая конференция «Наукоемкие технологии в машиностроении и авиадвигателестроении ТМ-2012». – Рыбинск : РГАТА, 2012. – С. 325 – 329.

4 **Болотеин, А. Н.** Применение компьютерного анализа для разработки методики регулирования размеров ротора ГТД [Текст] / А. Н. Болотеин, М. Е. Ильина. Материалы Российской научно-технической конференции «Проблемы определения технологических условий обработки по заданным показателям качества изделия». – Рыбинск : РГАТА, 2003. – С. 201 – 203.

5 **Болотеин, А. Н.** Применение метода конечных элементов для анализа напряженного состояния деталей и прогнозирования их поведения при эксплуатации [Текст] : сборник тезисов докладов / Международная молодёжная научная конференция XXX Гагаринские чтения. – Москва : МАТИ, 2006. – Том.5. – С. 19 – 20.

6 **Болотеин, А. Н.** Повышение качества изготовления высокоточных авиационных деталей на основе компьютерного моделирования их напряженного состояния после механической обработки [Текст] : сборник тезисов докладов / XXIX конференция молодых учёных и студентов. – Рыбинск : РГАТА, 2012. – С. 56 – 58.

7 **Болотеин, А. Н.** Методика определения технологических условий обработки высокоточных деталей с применением систем компьютерного моделирования [Текст] : сборник статей / Конференция «Разработка и внедрение ресурсо- и энергосберегающих технологий и устройств». – Пенза, 2010. – С. 83 – 85.

8 **Болотеин, А. Н.** Определение технологических условий обработки для высокоточных деталей с применением средств компьютерного моделирования [Текст] : сборник тезисов докладов / Практическая конференция «Наукоемкие технологии в машиностроении». – Ишимбай, Уфа, 2010. – С. 75 – 77.

9 **Болотеин, А. Н.** Особенности применения компьютерного моделирования при назначении технологических условий обработки высокоточных деталей [Текст] / Международная молодёжная научная школа-семинар «Физические основы высокоскоростной обработки и технологическое обеспечение компьютерных технологий в машиностроении» – Ульяновск, 2011. – С. 56 – 59.

Зав. РИО М. А. Салкова

Подписано в печать 22.10.2014.

Формат 60×84 1/16. Уч.-изд.л. 1. Тираж 90. Заказ 242.

Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П. А. Соловьева (РГАТУ имени П. А. Соловьева)

Адрес редакции: 152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53

Отпечатано в множительной лаборатории РГАТУ имени П. А. Соловьева 152934, г. Рыбинск, ул. Пушкина, 53