

05.02.08

ЭЛК

Б 791

Контрольный
экземпляр

На правах рукописи



Болдырев Игорь Станиславович

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ
РЕЗЬБЫ МЕТЧИКАМИ НА ОСНОВЕ ДИСКРЕТНОГО ТВЕРДОТЕЛЬНОГО
МОДЕЛИРОВАНИЯ**

Специальность 05.02.08 – «Технология машиностроения»

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук**



Челябинск
издательство ЮУрГУ
2005

Работа выполнена на кафедре «Станки и инструмент» Южно-Уральского государственного университета.

Научный руководитель – доктор технических наук,
профессор И.Я. Мирнов.

Научный консультант – доктор технических наук,
профессор И.А. Щуров.

Официальные оппоненты: доктор технических наук В.П. Качаев,
кандидат технических наук А.П. Карасев.

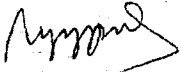
Ведущее предприятие – ЗАО «Челябинский инструментальный завод» (г. Челябинск).

Защита диссертации состоится 27 октября 2005 г., в 11 ч. на заседании диссертационного совета Д 212.298.06 при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76, 201 ауд.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан «21» сентября 2005 г.

Ученый секретарь диссертационного совета д.т.н., профессор



И.А. Щуров.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В современном машиностроении резьбообработка является одной из важнейших технологических операций. Зачастую единственным способом получения внутренних резьбовых отверстий является обработка их метчиками. Требования к точности изготовления резьбовых отверстий постоянно возрастают. Вместе с тем, обеспечение высокой точности резб все еще вызывает затруднения. Существующие методики расчета точности, основным показателем которой является приведенный средний диаметр резьбового отверстия, зачастую не позволяют спроектировать технологическое оснащение для получения резьбы необходимого качества. Это связано с множеством допущений в таких расчетах, а именно, они не учитывают трехмерную геометрию метчиков, погрешности их изготовления и износ. При определении сил резания используются, как правило, эмпирические зависимости, имеющие узкий диапазон применения.

В настоящее время на машиностроительных предприятиях одним из условий повышения конкурентоспособности продукции является снижение ее себестоимости при соблюдении высокой точности. При этом обеспечение точности проектируемой резьбонарезной операции на основе дорогостоящих опытных испытаний является малоэффективным, а зачастую и неприемлемым. Такое положение обуславливает необходимость создания автоматизированной методики расчета точности обработки на основе универсальной комплексной математической модели, охватывающей все технологические факторы в их взаимном влиянии, и определяет актуальность этой задачи в машиностроении.

Автор защищает.

1. Основанную на дискретном представлении комплексную, универсальную математическую модель расчета точности резьбообразования метчиками, учитывающую погрешности их изготовления и износ.

2. Методику расчета точности обработки внутренних резб метчиками, полученную на базе дискретной математической модели этого процесса и метода конечных элементов.

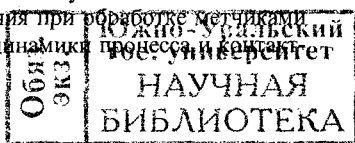
3. Результаты теоретических исследований сил резания и деформаций тонкостенных заготовок. Результаты численных расчетов влияния погрешностей изготовления метчиков на их приведенный средний диаметр.

Целью работы является повышение точности обработки метчиками путем более обоснованного выбора параметров технологических систем на основе совершенствования методики расчета, базирующейся на дискретном твердотельном моделировании.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи.

1. Дополнить универсальную математическую модель метчиков на основе дискретного твердотельного моделирования путем разработки зависимостей, учитывающих погрешности изготовления этих инструментов и их износ.

2. Решить задачу формообразования метчиками с учетом действия силовых факторов и для этого определить силы резания при обработке метчиками на основе метода конечных элементов с учетом динамики процесса и контактных явлений.



3. Выполнить верификацию разработанных зависимостей путем сравнения полученных по ним данных с собственными экспериментальными результатами и данными других исследователей, а именно: произвести расчет сил резания; установить влияние погрешностей изготовления метчиков на их приведенный средний диаметр; установить влияние деформаций тонкостенных заготовок с учетом образуемой в них резьбы на точность этой резьбы.

4. Провести апробацию полученной модели при решении производственной задачи обеспечения точности резьбонарезной операции и внедрить результаты диссертационных работ в производство и учебный процесс.

Методика исследований. Расчеты проводились с использованием теории расчета точности обработки мерными инструментами, теории резания, элементов алгебры множеств, аналитической геометрии, метода конечных элементов.

Научная новизна. Уточнена математическая модель точности резьбообразования метчиками на основе дискретного твердотельного моделирования в части учета погрешностей их изготовления и износа. Разработана схема расчета сил резания методом конечных элементов с учетом динамики стружкообразования и контактных явлений при формировании резьбы зубом метчика. Определены деформации тонкостенных цилиндрических заготовок в процессе нарезания в них резьбы с учетом этой резьбы.

Практическая ценность. Создана методика расчета точности обработки метчиками с учетом погрешностей их изготовления и износа, а также влияния сил резания. Установлена степень влияния погрешностей изготовления метчиков на их приведенный средний диаметр. Определены величины упругих деформаций тонкостенных заготовок и их влияние на приведенный средний диаметр резьбового отверстия при нарезании метчиками. Предложена конструкция резьбонарезного патрона для компенсации осевого смещения инструмента при обработке трапецеидальных резьб.

Реализация результатов работы. Созданная технологическая оснастка внедрена на «Челябинском инструментальном заводе». Ее использование позволило повысить стабильность точностных параметров резьб, нарезаемых метчиками. Программный комплекс дискретного моделирования и расчета точности обработки внедрен на ФГУП «Челябинский автоматномеханический завод» и в СКТБ «РИНЭКС». Его использование позволило сократить объем отладочных испытаний при проектировании операций резьбонарезания метчиками. Положения и результаты диссертации используются в учебном процессе Южно-Уральского государственного университета.

Апробация работы. Положения диссертации доложены и обсуждены на научно-технических конференциях при II и III международных выставках «Машиностроение. Прогрессивные технологии». (Челябинск, 1998-1999 г.), на 2-й межвузовской отраслевой научно-технической конференции «Автоматизация и прогрессивные технологии» (Новоуральск, 1999 г.), на международной научно-технической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования – производству – «Исследования 2001» (Барнаул, 2001 г.), на научных семинарах кафедры «Станки и инструмент» Южно-Уральского государственного университета (1998-2004).

Публикации. По материалам диссертации опубликованы 13 печатных работ научного характера и учебное пособие для студентов.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех разделов, общих выводов, списка литературы из 96 наименований и приложений на 20 страницах. Содержит 163 страницы машинописного текста, 83 рисунка, 6 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Анализ работы современных машиностроительных предприятий показывает, что получение точных внутренних резьбовых поверхностей зачастую вызывает значительные затруднения. В связи с этим актуальным является вопрос прогнозирования точности резьбонарезных операций. В первой главе диссертационной работы выявлены затруднения, встречающиеся на практике при обеспечении точности внутренней резьбы, получаемой метчиками. В частности, установлены трудности с получением годных трапецеидальных резьб в гайках ходовых винтов автомобильных домкратов, а также с резьбой мелкого шага, обрабатываемой в легких сплавах. Анализ этих примеров показал, что они имеют единую причину связанную с особенностями существующих теорий расчета точности резьбообработки метчиками.

В этой связи в работе рассмотрены существующие методики расчета точности резьбообработки. К ним в первую очередь следует отнести работы М.Х. Гольдфельда, В.В. Матвеева, И.Я. Мирнова, Г.Э. Таурита, Ю.Л. Фрумина, А.П. Черного, В.И. Шагуна, И.А. Щурова, В.Г. Якухина А.С. Ямникова и других авторов. Благодаря их исследованиям удалось решить подавляющее большинство проблемных вопросов, связанных с точностью резьбообработки. В частности В.В. Матвеевым установлено, что на приведенный средний диаметр резьбового отверстия оказывают влияние три обобщенных технологических фактора: производящий средний диаметр инструмента (на него влияют в основном погрешности изготовления метчика и его деформации), погрешность параметра его винтового движения, упругие и тепловые деформации резьбы детали.

Анализ показал, что существующие методики имеют недостатки. Во-первых, отсутствует учет совместного влияния всех поверхностей метчиков, погрешностей их изготовления и износа на производящий средний диаметр этих инструментов. Во-вторых, существующие аналитические зависимости между погрешностями движения инструмента и изменением приведенного среднего диаметра резьбы детали, основаны на множестве допущений, присущих плоским расчетным схемам, разобщены и не учитывают взаимного влияния всех погрешностей движения. В-третьих, расчеты деформаций заготовки не учитывают наличие деформаций собственно их резьбы. Все это, очевидно, снижает точность и достоверность получаемых результатов и не позволяет эффективно использовать подобные расчеты на практике.

Наряду с вышеизложенным, отмечается, что при резьбообработке мерными инструментами (в частности метчиками), силы, возникающие на элементах технологической системы, являются обычно решающим фактором для

обеспечения ее точности. Эти силы влияют на деформации инструментов, изменяя тем самым их производящий размер, влияют на движение инструментов, производя их смещение относительно требуемой траектории, и, наконец, приводят к деформациям заготовок. В связи с этим, достаточно подробно проанализированы существующие методики расчета всех составляющих силы резания при резбонарезании метчиками. Установлено, что они имеют в основном эмпирический характер, и поэтому, узкий спектр применения лишь для определенной марки материала, требуют множество параметров, определяемых опытным путем (усадка стружки, угол сдвига и т.д.). Они также не учитывают несвободный характер резания, малые задние углы, наросты, налипания, наличие ведущих или ведуще-выглаживающих элементов.

Таким образом, проведенный обзор методик расчета точности обработки мерными инструментами показал, что выдвинутый ранее тезис о необходимости совершенствования методики расчета точности обработки, которая, во-первых, отражала бы пространственные особенности инструментов, учитывающие погрешности изготовления и износ, во-вторых, позволяла бы давать более точный расчет сил резания и учет их влияния на точность резбообработки, в-третьих, позволяла бы осуществлять решение задачи формообразования с учетом деформаций заготовки и инструмента от этих сил, а также с учетом погрешностей движения последнего, обусловленных погрешностями начальной установки элементов технологической системы и деформаций от несбалансированных сил, является обоснованным.

Для выбора такой методики расчета необходимо определиться с методом моделирования и расчета. Указанный выше анализ методик расчета точности резбообработки позволил установить, что они не имеют единой основы. Поэтому использование этих методик часто оказывается нерациональным. Для установления наиболее приемлемого метода кратко рассмотрены и численные методы моделирования инструмента и расчета точности обработки.

В частности, в Южно-Уральском государственном университете И.А. Щуровым разработана теория расчета точности обработки и параметров мерных инструментов на основе дискретного твердотельного моделирования (ДТМ). В основу этого метода положены известные рецепторные (ячеечные) модели. Такие модели позволили описать единым набором уравнений значительную часть резбообразующих инструментов, и в частности, метчиков по номинальным размерам. Кроме того, данный метод позволил в общем виде решить задачу формообразования мерными инструментами, а также вести расчет сил резания, деформаций инструментов и заготовок на единой основе. Следовательно, именно такой метод моделирования может быть положен в основу комплексной теории расчета точности резбообразования метчиками.

Вместе с тем, с помощью данного метода пока не получены конкретные зависимости, учитывающие влияние погрешностей изготовления инструментов и износа на точность резбообразования. Кроме того, не решена задача точного расчета сил резания численными методами, применяемыми в ДТМ. Не определено влияние деформаций нежестких заготовок с учетом образующей в них резьбы на точность этой резьбы. Между тем, как показано в обзоре, эти факторы оказывают значительное, а силы резания, решающее влияние на точность

резьбообразования метчиками. В связи с этим, методика моделирования нуждается в дополнении в части учета вышеперечисленных факторов, что и реализовано в данной работе.

Совершенствованию математической модели точности резьбообразования метчиками на основе ДТМ посвящена в т о р а я глава работы. Согласно ДТМ, расчет точности обработки резьбы метчиками включает *три этапа*: моделирование тела и поверхности инструмента с учетом погрешностей их изготовления и износа и моделирование тела исходной заготовки; решение задачи формообразования с учетом влияния технологических факторов и последующим расчетом рецепторов заготовки после обработки; наконец, расчет приведенного среднего диаметра этой заготовки. Первые два этапа являются предметом настоящей диссертации. *Третий этап* был подробно разработан ранее и поэтому соискателем в данной работе не рассматривался.

Математические модели метчиков, как и других мерных резьбообразующих инструментов, рассчитываемых по номиналу, уже созданы ранее и рассмотрены в первой главе диссертации. Во второй главе диссертантом выполнено расширение этой модели путем учета технологических факторов, а именно *погрешностей изготовления метчиков и их износа*. Согласно используемому методу, из-за ограничений по производительности современных ЭВМ, модель может быть реализована на основе операций с неравенствами или операций с использованием множеств. Первоначально в работе рассматривался первый способ. В соответствии с 4-м принципом ДТМ моделирование метчика проводится с учетом последовательности технологических операций его изготовления и начинается с заготовки, погрешность размеров которой, учитываются их тривиальным изменением. Далее рассмотрено моделирование стружечных канавок метчика с учетом *погрешностей их изготовления и износа по передней поверхности*. Полученное в соответствии с расчетной схемой (рис. 1) уравнение наиболее сложного профиля, образованного дугами двух окружностей с прямой передней поверхностью и прямой спинкой с учетом лунки износа по *передней поверхности* имеет вид:

$$\rho_k(\varphi_k) = \begin{cases} -H_{\text{И}} \cos(\varphi_k - \mu) + \sqrt{(H_{\text{И}} \cos(\varphi_k - \mu))^2 - (H_{\text{И}} - R_{\text{П}}^2)} & \text{для } \varphi_{\text{К1}} < \varphi_{\text{К}} \leq \varphi_{\text{К2}}; \\ \frac{R_{\text{П}}}{\cos(\varphi_{\text{К}} - \pi_{\text{П}})} & \text{для } \varphi_{\text{К2}} < \varphi_{\text{К}} \leq \varphi_{\text{К3}}; \\ R_{\text{К1}} & \text{для } \varphi_{\text{К3}} < \varphi_{\text{К}} \leq \varphi_{\text{К4}}; \\ -H \cos(\varphi_k - \psi) + \sqrt{(H \cos(\varphi_k - \psi))^2 - (H - R_{\text{К2}}^2)} & \text{для } \varphi_{\text{К4}} < \varphi_{\text{К}} \leq \varphi_{\text{К5}}; \\ \frac{R_{\text{С}}}{\cos(\varphi_{\text{К}} - \pi_{\text{С}})} & \text{для } \varphi_{\text{К5}} < \varphi_{\text{К}} \leq \varphi_{\text{К6}}. \end{cases} \quad (1)$$

где $\rho_k(\varphi_k)$ – радиус-вектор точки, принадлежащей поверхности стружечной канавки в ее системе координат; φ_k – полярный угол этого вектора; $H_{\text{И}}$ – радиус вектор центра окружности износа по передней поверхности, $H_{\text{И}} = \sqrt{A_{\text{И}}^2 + B_{\text{И}}^2}$, $A_{\text{И}}$ и $B_{\text{И}}$ – координаты центра окружности износа в системе координат канавки;

μ - угол между указанным радиус-вектором и осью X_K ; R_{Π} - радиус окружности лунки износа по передней поверхности; P_n и P_c - расстояние от центра локальной системы координат до прямых на передней поверхности и спинки канавки; η_n и η_c - углы между векторами указанных расстояний и осью X_K ; R_{K1} и R_{K2} - радиусы дуг окружностей впадины и спинки канавки; H - расстояние между центрами этих окружностей; ψ - угол между радиусом-вектором центра второй окружности и осью X_K .

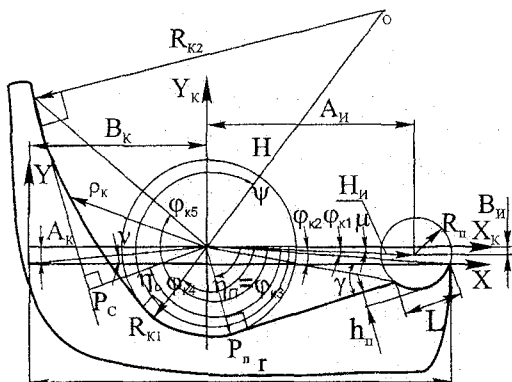


Рис. 1. Схема для расчета профиля канавки метчика с учетом погрешностей ее изготовления и износа по передней поверхности

В уравнении (1) погрешности изготовления метчика на операции фрезерования канавок учитываются изменением соответствующих линейных и угловых размеров, характеризующих отдельные кривые профиля канавки. Такое уравнение позволяют описать канавку из пяти кривых, образующих профиль, включая лунку износа. Если таких кривых меньше (однорядусная, двухрадиусная и т.д.), то линейные параметры отсутствующих кривых должны быть приняты равными нулю. Таким образом, уравнение (1) является универсальным и охватывает все перечисленные случаи исполнения стружечных канавок, которые составляют подавляющее большинство случаев практики изготовления метчиков. Определив уравнение профиля канавки с износом в локальной системе координат, следует далее установить условие принадлежности i -го рецептора тела заготовки пространству, занимаемому стружечной канавкой. Тогда, с учетом погрешностей изготовления уравнение для расчета декартовых координат i -го рецептора в локальной системе координат j -ой канавки имеют следующий вид:

$$\begin{pmatrix} X_{K,j} \\ Y_{K,j} \\ Z_{K,j} \end{pmatrix} = M_z(\delta \pm \Delta \delta_p) M_z^T(\theta, \pm \Delta \theta) \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} - M_z^T(v_i) \begin{pmatrix} G_i(z) \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (2)$$

где X_{kji} , Y_{kji} , Z_{kji} – декартовы координаты i -го рецептора в локальной системе координат j -ой канавки; M_Z – матрица преобразований поворота вокруг оси Z (на угол $\delta \pm \Delta\delta_p$); δ – угол поворота профиля винтовой стружечной канавки, зависящий от текущей координаты Z , $\delta = 2\pi ZK_{н.к.}/H$, H – шаг винтовой стружечной канавки, $K_{н.к.}$ – коэффициент, определяющий ее направление ($K_{н.к.} = -1$ для правой канавки, $K_{н.к.} = 1$ для канавки левого направления); $\Delta\delta_p$ – погрешность угла поворота канавки, связанная с отклонением от номинала ΔP_1 шага P_1 винтовой пары механизма подачи стола с заготовкой относительно фрезы, $\Delta\delta_p = 2\pi Z / (P \pm \Delta P_1)$; M_Z^T – транспонированная матрица преобразования вокруг оси Z ; θ_j – угол поворота глобальной системы для j -й канавки, соответствующий числу канавок метчика, $\theta_j = 360(j - 1)/n$, n – общее число канавок; $\Delta\theta$ – погрешность угла поворота делительной головки фрезерного станка; X , Y , Z – декартовы координаты тела исходной заготовки метчика; v_1 – угол, определяющий смещение локальной системы координат канавки относительно глобальной системы, $v_1 = \arctg(B_K \pm \Delta B_K / A_K + \Delta A_K)$, ΔB_K – величина погрешности установки фрезы зависит как от величины смещения ее вдоль своей оси Δm , так и угла разворота фрезы относительно заготовки $\Delta\omega$. Последний связан с погрешностью настройки станка по лимбу $\Delta\omega_1$, равной цене его деления и несоосностью центров в горизонтальной плоскости $\Delta\omega_2 = \arctg(\Delta T_r / L)$, здесь ΔT_r – допуск соосности центров станка в горизонтальной плоскости, L – длина заготовки метчика, $\Delta B_K = \Delta B_{K\min} \dots \Delta B_{K\max}$, $\Delta B_{K\min} = \sin(\omega - \Delta\omega)(m - \Delta m)$, $\Delta B_{K\max} = \sin(\omega + \Delta\omega)(m + \Delta m)$ при этом, знак плюс берется при увеличении угла ω против часовой стрелки и при возрастании величины Δm в положительном направлении оси $X_{ф.}$, знак минус – соответственно наоборот, $\Delta A_K = \pm \Delta A$, ΔA – погрешность межосевого расстояния между скрещивающимися осями фрезы и заготовки метчика (рис. 2); $G_1(z)$ – зависимость радиуса сердцевины метчика от его длины с учетом погрешности базирования заготовки в центрах станка, $G_1(z) = \sqrt{A_K^2 + B_K^2} - KZ - Z\Delta T/L$, ΔT – допуск соосности центров станка, L – длина заготовки метчика.

Следующим этапом производства метчика является операция резбобшлифования, на которой образуются затылованные вспомогательные задние поверхности. В связи с этим произведено описание таких поверхностей для рецепторной модели с учетом погрешностей их изготовления. Для этого сначала получены уравнения координат упорного и круглого профилей резьбы метчика с учетом погрешности шага и угла профиля в виде функции профиля резьбы: $X_p = F(Z)$. Далее получены уравнения координат рецепторов метчика с учетом погрешностей биения заготовки метчика в центрах резбобшлифовального станка:

$$\begin{pmatrix} X_{cp} \\ Y_{cp} \\ Z_{cp} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_3 \\ B_3 \\ 0 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_{cp1} \\ Y_{cp1} \\ Z_{cp1} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

где X_{cp} , Y_{cp} , Z_{cp} – глобальные декартовы координаты рецептора винтовой задней вспомогательной поверхности метчика; A_3 , B_3 – величины смещения локальной системы винтовой задней поверхности (X_{cp1} , Y_{cp1} , Z_{cp1}) относительно глобальной системы координат метчика вдоль осей X и Y .

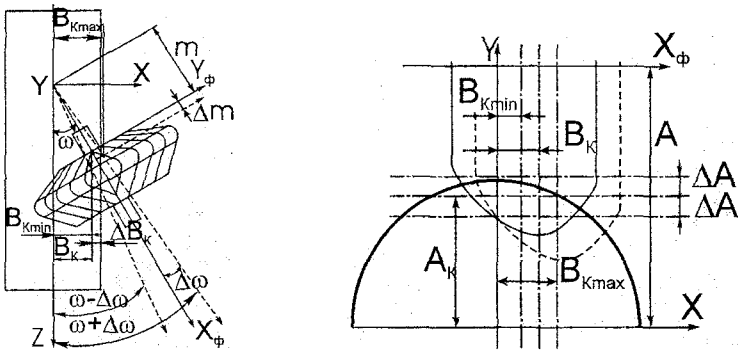


Рис. 2. Схема установки фрезы с учетом погрешностей этой установки для фрезерования винтовых стружечных канавок метчика

Далее, с помощью известных зависимостей находится радиус-вектор затылованной резьбовой поверхности ρ_{cp} и условие принадлежности i -того рецептора этой поверхности телу инструмента: $R_i \leq \rho_{cp}$. Аналогично рассмотренному выше, условия $R_i \leq \rho_n$ и $R_i \leq \rho_p$ используются при описании затылования по наружному диаметру и затылования главной задней поверхности режущей части. Таким образом, были получены уравнения математической модели для описания всех поверхностей подавляющего большинства метчиков с *учетом погрешностей их изготовления*.

Далее в работе рассмотрен износ метчиков по вспомогательным задним поверхностям (рис. 3). Для этого получены уравнения координат профиля износа в виде добавочных прямых:

$$X_p = r + (Z_u' - (X_1 - r)\text{tg}(\beta) + \Delta h_n)\text{ctg}(e_n). \quad (4)$$

$$X_p = r - (Z_u' - P + (X_4 - r)\text{tg}(\gamma) - \Delta h_n)\text{ctg}(e_n). \quad (5)$$

А также условия принадлежности точек профиля этим прямым (рис. 3):

$$Z_{II} < Z_u' < Z_{II1}; \quad Z_{II} < Z_u' < Z_{II1}, \quad (6)$$

где $Z_{II} = \Delta h_n / (\text{ctg}(\beta)\text{tg}(e_n) - 1) + Z_{II1} + \Delta h_n$; $Z_{II1} = P - Z_L - \Delta h_n - \Delta h_n / (\text{ctg}(\gamma)\text{tg}(e_n) - 1)$.

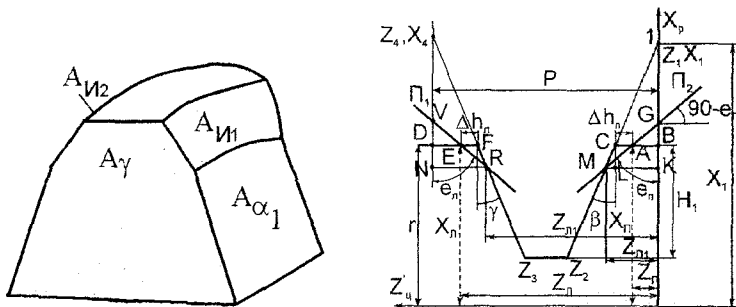


Рис. 3. Поверхности и профили износа по вспомогательным задним поверхностям

Полученные выше зависимости объединяются в системе условий, позволяющих определить координаты X, Y, Z рецепторов тела (ТИ) и поверхности метчика (ПИ) с учетом погрешностей его изготовления и износа:

$$\text{ТИ: } \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = M_z(\varphi) \begin{pmatrix} R_i \\ 0 \\ Z \end{pmatrix} \text{ для } \begin{cases} \rho_{kj} \geq \rho_k(\varphi_{kj}) \text{ для } j = 1 \dots n; \\ \rho_{kj}^* \geq \rho_k^*(\varphi_{kj}) \text{ для } j = 1 \dots n; \\ R_i \leq \rho_{cp}^*; \\ R_i \leq \rho_{cp}; \quad 0 < R_i \leq R_{зар}; \\ R_i \leq \rho_p; \quad 0 < Z \leq L; \\ R_i \leq \rho_n; \quad 0 < \varphi \leq 360. \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{ПИ: } \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix} = M_z(\varphi) \begin{pmatrix} R_i \\ 0 \\ Z \end{pmatrix} \text{ для } 0 < R_i \leq R_{зар} \cap 0 < Z \leq L \cap 0 < \varphi \leq 360 \quad (8)$$

и для

$$\begin{aligned} & ((\rho_{cp} \geq \rho_{cp}(\varphi_{cp})) \cap (\rho_{cp}^* \geq \rho_{cp}^*(\varphi_{cp})) \cap (R_i \leq \rho_{cp}) \cap (R_i \leq \rho_{cp}^*) \cap (R_i \leq \rho_n) \cap (R_i \leq \rho_p)) \cup \\ & (\rho_{cp} \geq \rho_{cp}(\varphi_{cp})) \cap (\rho_{cp}^* \geq \rho_{cp}^*(\varphi_{cp})) \cap (R_i \leq \rho_{cp}) \cap (R_i \leq \rho_{cp}^*) \cap (R_i \leq \rho_n) \cap (R_i \leq \rho_p)) \cup \\ & (\rho_{cp} \geq \rho_{cp}(\varphi_{cp})) \cap (\rho_{cp}^* \geq \rho_{cp}^*(\varphi_{cp})) \cap (R_i \leq \rho_{cp}) \cap (R_i \leq \rho_{cp}^*) \cap (R_i \leq \rho_n) \cap (R_i \leq \rho_p)) \cup \\ & (\rho_{cp} \geq \rho_{cp}(\varphi_{cp})) \cap (\rho_{cp}^* \geq \rho_{cp}^*(\varphi_{cp})) \cap (R_i \leq \rho_{cp}) \cap (R_i \leq \rho_{cp}^*) \cap (R_i \leq \rho_n) \cap (R_i \leq \rho_p)) \cup \\ & (\rho_{cp} \geq \rho_{cp}(\varphi_{cp})) \cap (\rho_{cp}^* \geq \rho_{cp}^*(\varphi_{cp})) \cap (R_i \leq \rho_{cp}) \cap (R_i \leq \rho_{cp}^*) \cap (R_i \leq \rho_n) \cap (R_i \leq \rho_p)) \cup \\ & (\rho_{cp} \geq \rho_{cp}(\varphi_{cp})) \cap (\rho_{cp}^* \geq \rho_{cp}^*(\varphi_{cp})) \cap (R_i \leq \rho_{cp}) \cap (R_i \leq \rho_{cp}^*) \cap (R_i \leq \rho_n) \cap (R_i \leq \rho_p)) \cup \end{aligned} \quad (9)$$

где R_i, φ, Z — цилиндрические координаты i -того рецептора. Неравенства со звездочками (*) соответствуют моделированию износа на передней и задней вспомогательных поверхностях (ф. (1), (4) - (6)).

Таким образом, приведенные выше уравнения образуют геометрическую математическую модель метчиков, в которой установлена взаимосвязь между чертежными номинальными параметрами метчиков, погрешностями их изготовления и износа с одной стороны и координатами рецепторов тел и по-

верхностей этих инструментов с другой стороны. Благодаря полученной модели, для любой из рассмотренных ранее конструкций метчиков не требуется составления специальных расчетных схем, вывода зависимостей и последующего программирования для автоматизированного проектирования. Таким образом, все эти конструкции инструментов могут быть смоделированы на основании приведенных зависимостей и созданной на их основе программе ЭВМ.

Далее рассмотрен второй вариант моделирования, а именно математическая модель метчиков с учетом погрешностей их изготовления на основе операций с множествами. Разработка модели в этом случае начинается аналогично предыдущему – с описания заготовки. Последнее ничем не отличается от рассмотренного нами ранее. Далее производится моделирование удаления припусков, которое реализуется через моделирование инструментов второго порядка и их формообразующих движений. Это обуславливает больший объем вычислений, но и позволяет более точно описать особенности изготовления реально существующих метчиков.

Для моделирования стружечных канавок получены уравнения координат профиля двуугловой фрезы с учетом погрешностей ее изготовления. Далее описана установка инструмента для фрезерования стружечных канавок с учетом погрешностей его установки. Полученные уравнения для определения координат рецепторов фрезы в системе координат метчика с учетом погрешностей установки фрезы имеют следующий вид:

$$\begin{pmatrix} X'_{\phi i} \\ Y'_{\phi i} \\ Z'_{\phi i} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m + \Delta m \\ 0 \\ A + \Delta A \end{pmatrix} + M_Y(\omega \pm \Delta\omega) \begin{pmatrix} X_{\phi i} \\ Y_{\phi i} \\ Z_{\phi i} \end{pmatrix}, \quad (10)$$

где M_Y – матрица преобразования систем координат при повороте вокруг оси Y ; ω_{ϕ} и $\Delta\omega_{\phi}$ – угол между осями фрезы и метчика и его погрешность; m и Δm – торцевое смещение фрезы и его погрешность; A и ΔA – межосевое расстояние и его погрешность.

После этого описано движение инструмента второго порядка (тела фрезы). Координаты рецепторов, множество которых образует тело фрезы $T_{\phi j}$ в некоторый момент времени j моделируемой обработки для первой канавки с учетом погрешности винтового движения фрезы определяются по условию:

$$\begin{pmatrix} X_{\phi j l} \\ Y_{\phi j l} \\ Z_{\phi j l} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ C_j \pm \Delta C \end{pmatrix} + M_Z(\epsilon_j) \begin{pmatrix} X'_{\phi j} \\ Y'_{\phi j} \\ Z'_{\phi j} \end{pmatrix}; \quad (11)$$

$$\epsilon_j = C_j/P;$$

$$-R_{\phi} < C_j < (l + R_{\phi}) \cap C_j = C_{j-1} + \delta C,$$

где C_j и δC – смещение фрезы вдоль оси метчика и шаг осевого формообразующего движения; ΔC – погрешность смещения фрезы вдоль оси метчика, обусловленная погрешностью параметра винтового движения фрезы,

$$\Delta C = \left(\frac{\Delta P_1}{2\pi} \right) \varepsilon_j, \quad \Delta P_1 - \text{погрешность шага ходового винта механизма подачи}$$

фрезы; ε_j – угол поворота фрезы вокруг указанной оси, отражающий вращение заготовки метчика; l – длина рабочей части метчика.

Семейство рецепторов тел фрезы к моменту времени j рассчитывается путем логического суммирования полученных множеств рецепторов:

$$\text{СТИ}_{\Phi_j} = \sum_{j=0}^j \text{ТФ}_j \quad (12)$$

К концу расчета должно выполняться условие $C_j = (l + R_\Phi)$. В этот момент будет получено множество рецепторов семейства тел фрезы за весь период “обработки”.

Тогда рецепторы тела метчика со стружечной канавкой рассчитываются с использованием разности множеств исходной заготовки метчика и полученного множества СТИ_{Φ_j} :

$$\text{ТИ} = \text{ИТЗ} \setminus \text{СТИ}_{\Phi_j}, \quad (13)$$

где ТИ – множество рецепторов тела метчика со стружечной канавкой; ИТЗ – множество рецепторов исходного тела заготовки;

Для расчета остальных канавок необходимо матрицу координат, полученных в уравнении (10), умножить на матрицу преобразования вращения на угловой шаг канавок подобно тому, как это было представлено выше в уравнении (2).

Далее в работе рассмотрено моделирование резьбы и затылований метчика в модели операций с множествами. *Шлифование резьбы* по кинематике отличается от обработки стружечных канавок только движением затылования. И в том и другом случаях ведется обработка дисковым инструментом винтовой канавки. В связи с этим решение данной задачи практически не отличается от предыдущего случая. В частности, профиль резьбового абразивного инструмента для случаев метрической, упорной, трапецеидальной и прямоугольной резьбы с учетом погрешности его изготовления (заправки) рассчитывается по тем же зависимостям, что и профиль самой резьбы. Для получения координат рецепторов абразивного круга в некоторый момент времени j необходимо воспользоваться уравнениями для моделирования винтового движения и к полученной матрице добавить матрицу затылования с учетом погрешностей движения затылования и, таким образом, рассчитать координаты рецепторов, образующих множество абразивного инструмента СТИ_{Φ_j} :

$$\begin{pmatrix} X_{K_j} \\ Y_{K_j} \\ Z_{K_j} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} K_x + \Delta K_x \\ K_y + \Delta K_y \\ P_p(n-1) \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} X_{\Phi_j} \\ Y_{\Phi_j} \\ Z_{\Phi_j} \end{pmatrix}, \quad (14)$$

где X_{K_j} , Y_{K_j} , Z_{K_j} – координаты рецепторов абразивного круга в момент времени j ; K_x и K_y – перемещения круга по осям x и y при затыловании, они определяются некоторыми функциями от угла поворота круга ε : $K_x = F_1(\varepsilon)$, $K_y = F_2(\varepsilon)$; ΔK_x и ΔK_y – погрешности перемещения круга при затыловании, обусловленные биением заготовки метчика относительно центров станка; P_p и n – шаг резьбы и номер ее захода (используется для многозаходных резьб).

В итоге, полученные множества используются для расчета множества рецепторов тела метчика с учетом погрешностей его изготовления и износа, которые определяются по зависимости:

$$ТИ = ИТЗ \setminus СТИ_{\Phi_j} \setminus СТИ_{a_{ji}}, \quad (15)$$

где $СТИ_{a_{ji}}$ – множество рецепторов семейства тел i -того абразивного инструмента к моменту времени j .

Множества рецепторов поверхности метчика с учетом погрешностей его изготовления рассчитываются через параметры состояния по уравнениям:

$$ПИ_{i,j,k} = ТИ_{j,k} \text{ для } \begin{cases} (ТИ_{j+1,j,k} = 0) \cap (ТИ_{j-1,j,k} = 0) \cap \\ (ТИ_{j,j+1,k} = 0) \cap (ТИ_{j,j-1,k} = 0) \cap \\ (ТИ_{j,j,k+1} = 0) \cap (ТИ_{j,j,k-1} = 0), \end{cases} \quad (16)$$

где индексы i, j, k соответствуют некоторому рецептору в i -ой строке, j -ом столбце и k -ом слое матрицы рецепторов инструмента.

Таким образом, полученная математическая модель на основе операций с множествами, как и модель с неравенствами, позволяет описать тело и поверхность метчика с учетом погрешностей изготовления и износа. Полученные здесь формулы более точно, чем известные модели отражают особенности изготовления реально существующих метчиков.

Далее в работе рассмотрен *второй этап* расчета точности – решение задачи формообразования с учетом силовых факторов, а именно, сил резания. Необходимо отметить, что задача формообразования с учетом кинематики движения инструмента решена ранее. В соответствии с известным *первым принципом* дискретного моделирования элементов технологической системы и решения на этой основе технологических задач, необходимо геометрическое моделирование, физическое моделирование и решение задачи формообразования осуществлять на единой основе. Такой основой является принятый дискретный подход, где используются рецепторы, которые при решении физических задач преобразуются в конечные элементы. Таким образом, для решения задачи формообразования с учетом технологических факторов расчет сил резания необходимо осуществлять с использованием метода конечных элементов (МКЭ). В данной работе предложено использовать МКЭ в контактной постановке. В связи с этим во второй главе настоящей работы рассмотрен математический аппарат МКЭ и выбрана та его реализация, (явный динамический ана-

лиз) которая позволяет адекватно описать процесс резания с учетом стружкообразования. Для верификации такого подхода первоначально рассматривалось свободное ортогональное резание. Были определены расчетная схема при свободном резании, и следующие допущения и граничные условия: тепловые явления не учитываются; нижняя и левая боковая грани заготовки жестко закреплены; инструменту сообщается движение со скоростью резания; материал заготовки является изотропным и подчиняется закону Гука в упругом состоянии и условию текучести Мизеса в пластическом; материал реза абсолютно жесткий, недеформируемый; между сопрягаемыми узлами заготовки и инструмента в каждый момент времени обработки устанавливаются контактные элементы; контактные элементы, в числе прочего, характеризуются коэффициентом трения; значение коэффициента трения выбирается постоянным на всех гранях реза; при расчете силы трения используется условие: $\tau = \mu\sigma$ при $\tau < \tau_s$ и $\tau = \tau_s$ при $\tau \geq \tau_s$ (здесь τ - касательное напряжение, μ - коэффициент трения, σ - нормальное напряжение, τ_s - касательное напряжение текучести материала заготовки); износ учитывается только геометрически, в виде округления режущей кромки; свойства обрабатываемых материалов задавались в виде кривой упрочнения.

В третьей главе работы на основе разработанной математической модели, приведена в виде алгоритма методика расчета точности приведенного среднего диаметра резьбового отверстия, разработанная совместно с И.А. Щуровым (рис. 4). Здесь же на основе разработанной математической модели изложены расчеты сил резания при свободном и несвободном резании, а также расчеты точности резьбообразования метчиками. В частности, доказана адекватность применения МКЭ в контактной постановке для расчета сил при свободном резании. Для этого проведено сопоставление зависимостей величин сил от толщины срезаемого слоя и величины переднего угла, рассчитанных МКЭ с экспериментальными данными других авторов. Эти зависимости показали количественную сходимость: отклонения указанных данных не превышали 25%. На следующем этапе рассматривалось несвободное резание, характерное для метчиков. С помощью МКЭ рассчитаны силы при несвободном резании, которые показали количественную сходимость с экспериментальными данными других авторов.

Все это говорит об адекватности предложенного метода расчета сил резания. Таким образом, выполненные расчеты сил резания для лезвий с тремя режущими кромками (какие имеются у метчиков) позволили, используя рецепторы как конечные элементы, реализовать задачу формообразования с учетом деформации элементов технологической системы. Такая задача решается итерационно, где на каждом шаге итераций получаемые МКЭ множества деформированных рецепторов и аппарат алгебры множеств позволяют найти состояние заготовки в каждый момент времени обработки и после моделирования всей обработки найти рецепторы резьбы детали.

Здесь же, в третьей главе работы, с использованием разработанной модели исследовано влияние погрешностей изготовления метчиков (шага и угла профиля) с учетом совместного влияния всех поверхностей на их приведенный

средний диаметр. Для этого с помощью программы ЭВМ получены дискретные трехмерные модели метчиков с погрешностями шага и профиля.

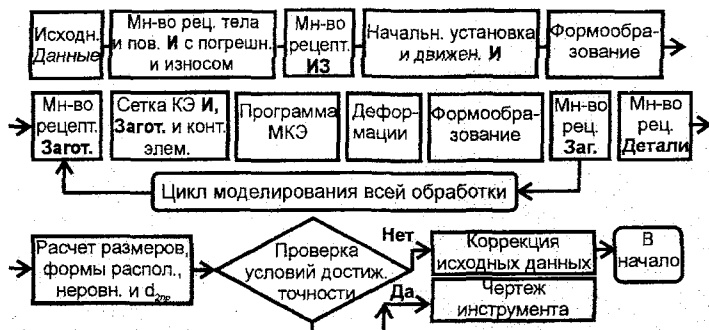
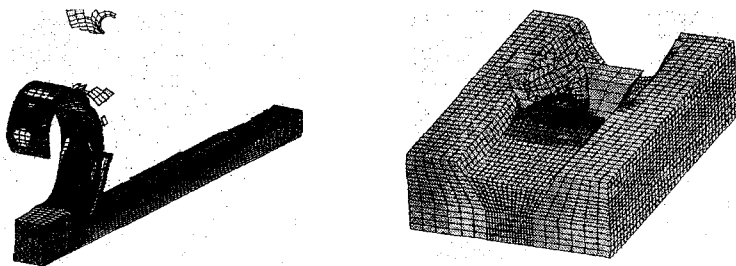


Рис. 4. Алгоритм расчета точности обработки $d_{пр}$ резьбы детали



Ст. 40, $V=1,67$ м/с; $\gamma=20^\circ$; $\alpha=0^\circ$; $a=1$ мм; Ст. 40, $V=2$ м/с; $\gamma=10^\circ$; $\alpha=0^\circ$; $a=1$ мм

Рис. 5. Распределения эквивалентных деформаций в заготовке в различные моменты времени

В результате изучения влияния погрешности шага выявлено, что значения приведенного среднего диаметра метчика, полученные нашим методом имеют существенное расхождение с аналогичным расчетом по известной методике В.В. Матвеева (рис. 6а). Это связано с тем, что в известной методике рассматривается лишь один виток с погрешностями шага. В связи с этим, диссертантом предложено ввести поправочный коэффициент k , учитывающий количество витков резьбы и накопленную погрешность шага, в формулу В.В. Матвеева для расчета приведенного среднего диаметра метчика:

$$d_{ГП} = d_{ср} + 1,732|\Delta P|k \quad (17)$$

Таким образом, установлено, что необходимым условием при расчете приведенного среднего диаметра резьб деталей групп нормальной и большой

длины свинчивания, образуемых мерными инструментами, является обязательный учет накопленной погрешности шага резьбы этих инструментов.

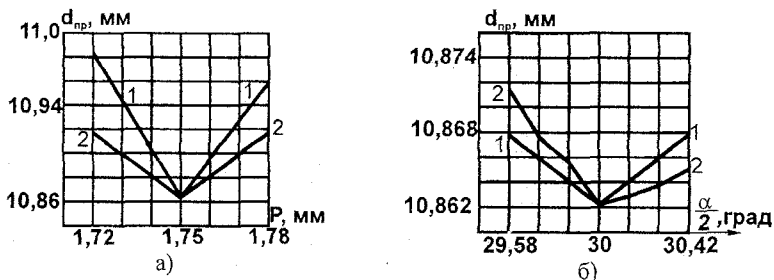


Рис. 6. Зависимость приведенного среднего диаметра метчика М12х1,75 от погрешности шага и половины угла профиля его резьбы:

1 — значение $d_{ср}$ по данным автора; 2 — значение $d_{ср}$ по В.В. Матвееву.

Поскольку влияние третьего обобщенного фактора на точность резьбового отверстия наиболее сильно проявляется в нежестких тонкостенных деталях, то в третьей главе изучено влияние деформаций тонкостенных резьбовых заготовок на приведенный средний диаметр их резьбы. При этом, расчетным путем по созданной методике получены рецепторные, и на этой основе, конечноэлементные модели таких заготовок с учетом наличия получаемой в них резьбы. Указанная методика учитывала все составляющие сил резания и их распределенный характер по длине режущей части инструмента. В результате расчета выявлено, что упругие деформации резьбы заготовок могут значительно превышать допуск на средний диаметр, и следовательно, при проектировании метчиков необходим их учет (рис. 7, 8). Установлено, что при нарезании резьбы в тонкостенных цилиндрических заготовках с отношением их радиуса к толщине стенки пятнадцать и более необходимо учитывать их радиальные деформации в момент обработки, которые могут составлять от 15% до 50% допуска по среднему диаметру резьбы четвертой степени точности (ГОСТ 16093-81). Установлено также, что учет образуемой резьбы в процессе ее нарезания в заготовках с отношением толщины стенки к высоте профиля резьбы менее двух и превышении пятнадцатикратного отношения радиуса заготовки к ее толщине, обуславливает дополнительное увеличение радиальных деформаций, которые могут составлять от 5% до 12% допуска по среднему диаметру резьбы четвертой степени точности (ГОСТ 16093-81). Для проверки достоверности таких расчетов проведена их экспериментальная проверка путем измерения деформаций тонкостенных заготовок, нарезанных стандартными метчиками М44х1. Результаты измерений показали, что расхождение опытных данных и данных, полученных расчетами не превышает 18%.

В четвертой главе работы рассмотрен пример внедрения разработанной модели и методики расчета точности обработки в действующее производство. С этой целью решена, описанная в первой главе задача обеспечения точности операции резьбонарезания гайки автомобильного домкрата, имеющей

трапецидальную резьбу. Для этого проведен анализ влияния обобщенных технологических факторов на точность приведенного среднего диаметра резьбы детали. В частности, определены силы резания действующие на метчике, деформации метчика от действия этих сил, деформации витков резьбы заготовки. В ходе расчетов установлено, что причиной появления негодных деталей является погрешность параметра винтового движения инструмента вследствие действия нескомпенсированных сил резания. Расчетным путем определена величина подрезания профиля резьбы гайки от действия этого фактора.

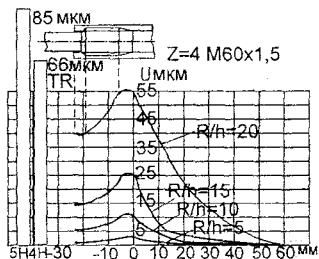


Рис. 7. Распределения максимальных радиальных деформаций тонкостенных заготовок по длине резьбового участка

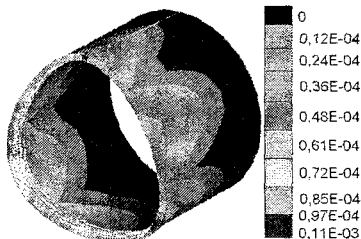


Рис. 8. Распределения эквивалентных деформаций в тонкостенной заготовке с резьбой ($R/h=5$, $Z=3$, $F_T=270$ Н, $F_{OC}=91$ Н, $F_T=89$ Н, M60x2)

Для решения указанной задачи на основе результатов расчетов проанализированы различные варианты ее практического решения. В результате, была спроектирована технологическая оснастка - резьбонарезной патрон, позволяющий обеспечить получение резьбы требуемой точности (рис. 9). Таким образом, проведенные расчеты и практическая реализация работы доказали высокую эффективность созданной модели и методики расчета точности резьбообразования метчиками.

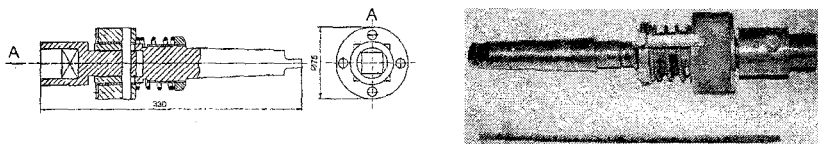


Рис. 9. Изготовленный в ЮУрГУ патрон резьбонарезной для получения резьбы Tr33,5x3 - 6H

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

В процессе выполнения диссертационной работы получены следующие **результаты**.

1. Для реализации первого этапа расчета точности резьбообработки создана математическая модель тела и поверхности метчиков с учетом погрешно-

стей изготовления и износа как на основе операций отношения, так и с использованием операций с множествами.

2. Определены: постановка, основные зависимости и параметры метода конечных элементов, достаточные для расчета сил при несвободном резании с учетом пластических и контактных явлений, динамики стружкообразования. Определена расчетная схема, начальные и граничные условия для расчета сил резания МКЭ и произведена их проверка путем сопоставления с известными данными.

3. Получена методика расчета приведенного среднего диаметра метчиков с учетом совместного влияния параметров всех поверхностей этих инструментов, погрешностей их изготовления (по шагу и углу профиля резьбы) и их износа.

4. Разработана методика расчета деформаций тонкостенных заготовок в момент резбонарезания с учетом образуемой в них резьбы, позволившая уточнить влияние таких деформаций на точность получаемой резьбы.

5. На основе созданных математических моделей и методик расчета решена производственная задача получения трапецидальных резьб в гайке домкрата, выпускаемой на Челябинском инструментальном заводе, результаты исследований внедрены в производство и учебный процесс.

Результаты работы позволили сделать следующие научные **выводы**.

1. Созданные для расчета точности обработки математические модели метчиков с учетом совместного влияния параметров всех поверхностей этих инструментов и погрешностей их изготовления и износа; модели формообразования с учетом сил резания и деформаций заготовок, основанные на дискретном твердотельном моделировании, являются достаточными для расчета точности обработки резьбы метчиками.

2. Установлено, что необходимым условием при расчете приведенного среднего диаметра резьб деталей групп нормальной и большой длины свинчивания, образуемых мерными инструментами, является обязательный учет накопленной погрешности шага резьбы этих инструментов.

3. Установлено, что при нарезании резьбы в тонкостенных цилиндрических заготовках с отношением их радиуса к толщине стенки пятнадцать и более необходимо учитывать их радиальные деформации в момент обработки, которые могут составлять от 15% до 50% допуска по среднему диаметру резьбы четвертой степени точности (ГОСТ 16093-81).

4. Установлено, что учет образуемой резьбы в процессе ее нарезания в заготовках с отношением толщины стенки к высоте профиля резьбы менее двух и превышении пятнадцатикратного отношения радиуса заготовки к ее толщине, обуславливает дополнительное увеличение радиальных деформаций, которые могут составлять от 5% до 12 % допуска по среднему диаметру резьбы четвертой степени точности (ГОСТ 16093-81).

**Основное содержание диссертации изложено
в следующих работах**

1. Щуров И.А., Загородская С.В., Болдырев И.С. Расчет сил резания на метчиках с использованием дискретной модели// Прогрессивные технологии в машиностроении: Тематический сборник научных трудов. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 1997. – С. 20-25.
2. Щуров И.А., Загородская С.В., Болдырев И.С. Применение типовых решающих МКЭ программ в тепловых и структурных расчетах // Машиностроение-98. Прогрессивные технологии. II Международная специализированная выставка: Сб. тезисов докладов конф. – Челябинск: АЧО, 1998. – С. 40.
3. Щуров И.А., Попов М.Ю., Болдырев И.С. Расчет напряжений и деформаций метчиков// Известия Челябинского научного центра, в. 2.– 1999.– С. 50 – 53.
4. Mironov I.Y., Shurov I.A., Boldyrev I.S. Evaluation Of Cutting Forces in Fem Simulation of Machining// Известия Челябинского научного центра, в. 2., 1999.– С. 57 – 59.
5. Мирнов И.Я., Щуров И.А., Болдырев И.С. Расчет сил резания методом конечных элементов на основе контактного взаимодействия инструмента и заготовки// Автоматизация и прогрессивные технологии. – Новоуральск: УЭХК, 1999.– С. 39 – 42.
6. Щуров И.А., Болдырев И.С. Расчет сил резания и крутящих моментов при нарезании резьб метчиками методом конечных элементов на основе контактного взаимодействия инструмента и заготовки// Прогрессивные технологии в машиностроении. Выставка “Машиностроение-99”. – Челябинск: ЮУрГУ, ЮжУралЭКСПО, 1999.– С. 9 – 14.
7. Щуров И.А., Болдырев И.С. Расчет точности обработки мерными инструментами// Прогрессивные технологии в машиностроении. Выставка “Машиностроение-99”. – Челябинск: ЮУрГУ, ЮжУралЭКСПО, 1999.– С. 14 – 19.
8. Мирнов И.Я., Болдырев И.С. Определение производящего размера мерных инструментов при получении внутренних резьб на тонкостенных заготовках. Прогрессивные технологии в машиностроении. – Челябинск: ЮУрГУ, 2000. – С. 90 - 100.
9. Мирнов И.Я., Щуров И.А., Болдырев И.С. Опытное определение изменения среднего диаметра резьбы тонкостенной детали при обработке машинными метчиками// Прогрессивные технологии в машиностроении. Челябинск: ЮУрГУ, 2000.– С. 100 – 101.
10. Болдырев И.С. Определение деформаций тонкостенных заготовок при обработке резьб метчиками: Тез. междунар. научн.-техн. конф. “Фундаментальные и прикладные исследования – производству – “Исследования 2001”. Барнаул, 2001.– С. 17.
11. Численное моделирование процесса резания и инструмента/ И.Я. Мирнов, И.А. Щуров, И.С. Болдырев, М.Ю. Попов // Технологические системы в машиностроении. Тула: ТулГУ, 2002.– С. 57 – 62.
12. Болдырев И.С. Расчет сил резания и напряженно-деформированного состояния металла заготовки методом конечных элементов. – Челябинск, ЮУрГУ, 2002. – 40 с.
13. Болдырев И.С., Щуров И.А., Загородская Е.В. Анализ современных методик расчета сил резания методом конечных элементов// Прогрессивные технологии в машиностроении. Челябинск: ЮУрГУ, 2002. – С. 137 – 141.
14. Щуров И.А., Болдырев И.С. Расчет сил резания методом конечных элементов//СТИН, №1, 2004. – С. 14 – 16.

Болдырев Игорь Станиславович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ РАСЧЕТА ТОЧНОСТИ
ОБРАБОТКИ РЕЗЬБЫ МЕТЧИКАМИ НА ОСНОВЕ ДИСКРЕТНОГО
ТВЕРДОТЕЛЬНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Специальность 05.02.08 – «Технология машиностроения»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Издательство Южно-Уральского государственного университета

Подписано в печать 20.07.2005. Формат 60x84 1/16. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 1,16. Уч. изд. л. 1. Тираж 100 экз. Заказ 266 / 243.

УОИ издательства. 454080, г. Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.