
Министерство образования и науки Российской Федерации

УДК 621.992.7
ГРНТИ 55.16.18
Инв. №

УТВЕРЖДЕНО:

Исполнитель:
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Магнитогорский государственный техниче-
ский университет им. Г.И. Носова»

От имени Руководителя организации
Ректор
_____/Колокольцев В.М./
М.П.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ ОТЧЕТ

**о выполнении 2 этапа Государственного контракта
№ 14.740.11.0684 от 12 октября 2010 г.**

Исполнитель: Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова»

Программа (мероприятие): Федеральная целевая программа «Научные и научно-педагогические кадры инновационной России» на 2009-2013 гг., в рамках реализации мероприятия № 1.3.2 Проведение научных исследований целевыми аспирантами.

Проект: Теоретические и экспериментальные исследования механики процесса накатки крупной резьбы

Руководитель проекта:
_____/Железков Сергей Олегович
(подпись)

**Магнитогорск
2011 г.**

Реферат

Отчет 54 с., 3 ч., 24 рис., 2 табл., 43 источн., 0 прил.

«Резьба, накатка резьбы, путевые шурупы , точность резьбы , резьбонакатной инструмент , износостойкость инструмент»

Разработана методика прогнозирования точности накатанной резьбы. В основу методики положен метод определения случайных погрешностей, возникающих в результате колебаний радиальной составляющей усилия накатывания, которые возникают по причине колебаний предела текучести σ_0 материала заготовки, температуры нагрева T , диаметра d_0 и длины L исходной заготовки, коэффициента трения μ . 2. Используя программный комплекс «DEFORM-3D», определялись случайные погрешности диаметра накатываемой резьбы Δd_σ , Δd_T , Δd_μ , Δd_{d_0} , Δd_L , возникающие при колебании технологических параметров $(\sigma_0, T, \mu, d_0, L)$, и вычислялась общая случайная погрешность, по которой оценивалась точность накатываемой резьбы.

Разработана методика прогнозирования износостойкости резьбонакатного инструмента, которая базируется на основных положениях энергетической теории изнашивания твердых тел Крагельского-Гаркунова.

По результатам компьютерного моделирования установлен характер изменения касательных напряжений τ по длине зоны контакта металла с заготовкой и определена работа сил трения A_{mp} на контактной поверхности. Конкретные расчеты выполнены для оценки ресурса работы резьбонакатных плашек для накатки резьбы путевого шурупа ЦП-65 (ТУ 14-176-133-2004). Рассчитано ожидаемо количество накатанных изделий до момента образования брака по причине износа выступов резьбонакатных плашек.

Подана заявка на полезную модель «Инструмент для накатки крупной резьбы».

Содержание

Введение.....	5
Основная часть.....	6
2. Исследование силового воздействия в системе «станок – инструмент – заготовка» при накатывании наружной резьбы.....	6
2.1. Разработка методики прогнозирования точности накатанной резьбы в зависимости от жесткости системы «станок-инструмент-заготовка» и колебаний конструктивно-технологических параметров.....	6
2.1.1. Проблемы обеспечения точности резьбы при накатывании.....	
2.1.2. Жесткость резьбонакатных станков.....	10
2.1.3. Основы методики определения случайных погрешностей накатанной резьбы.....	12
2.1.4. Прогнозирование точности резьбы путевых шурупов, формируемой накаткой плоскими плашками.....	21
2.2. Разработка методики прогнозирования износостойкости инструмента для накатки резьбы.....	30
2.2.1. Основы методики прогнозирования износостойкости.....	30
2.2.2. Определение показателя энергетической интенсивности изнашивания (ПЭИИ).....	37
2.2.3. Расчет ресурса работы плашек для горячей накатки путевых шурупов.....	41
2.3. Определение рациональных режимов накатывания резьбы на путевых шурупах.....	44
Заключение.....	48
Список использованных источников.....	50

ВВЕДЕНИЕ

Точность резьбы зависит от колебаний различных факторов процесса накатывания (размеры заготовки, механические свойства материала накатываемой заготовки, условия трения, температура и т.п.), которые вызывают колебания радиальных усилий накатывания, а также жесткости силовой системы «станок – инструмент – заготовка». На стадии проектирования технологического процесса накатывания резьбы необходимо прогнозировать влияние этих колебаний на погрешности геометрических размеров получаемых резьб.

Резьбонакатной инструмент работает в условиях интенсивного абразивного истирания рабочих поверхностей. Его износ зависит от внешних воздействий: усилий, действующих на инструмент со стороны накатываемой заготовки, температуры металла, скорости накатки и скорости проскальзывания, марки стали накатываемого изделия и др. Наибольшее влияние на износ оказывают касательные напряжения, действующие на поверхности контакта заготовки и инструмента.

Поэтому очевидна необходимость разработки математических моделей и методов, применение которых к расчетам процессов накатывания, позволит с высокой точностью определять напряженно-деформированное состояние в накатываемой заготовке и энергосиловые параметры резьбонакатывания, что обеспечит высокую надежность прогнозирования точности накатываемой резьбы и износостойкости накатного инструмента.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

2. Исследование силового воздействия в системе «станок – инструмент – заготовка» при накатывании наружной резьбы.

2.1. Разработка методики прогнозирования точности накатанной резьбы в зависимости от жесткости системы «станок-инструмент-заготовка» и колебаний конструктивно-технологических параметров.

2.1.1. Проблемы обеспечения точности резьбы при накатывании

Под точностью изготовления деталей понимается степень приближения значений их геометрических параметров по размерам и форме к значениям этих параметров, которые регламентированы в нормативно-технической документации (ГОСТы, ТУ, чертежи и т.п.) [1]. Количественным критерием оценки точности является наибольшая величина отклонений соответствующих размеров от их регламентированных значений.

Точность резьбы является комплексным показателем, который оценивается по следующим параметрам [3-6]:

- а) точность размеров (наружный и внутренний диаметры, шаг резьбы) ;
- б) точность формы профиля резьбовой части;
- в) точность взаимного расположения поверхностей (соосность резьбовой и гладкой частей детали).

Точность размера (диаметр, шаг, угол профиля и т. д.) регламентируется соответствующими допусками. При попадании размера в соответствующее поле допуска размер считается точным.

К отклонениям формы в поперечном сечении относятся овальность, огранка, а в продольном сечении – конусность, изогнутость. Особенно высокие требования к точности формы предъявляются в ответственных соединениях, где погрешность формы отражается на их эксплуатационных характеристиках.

Общая погрешность изготовления резьбовых деталей является следствием влияния ряда физико-механических и технологических факторов процесса накатывания [7]. Каждый фактор вызывает образование характерных первичных погрешностей изготовления, к числу которых относятся:

- 1) погрешности, вызываемые неточностью исходной заготовки и колебаниями механическими свойствами материала заготовки;
- 2) погрешности, вызываемые размерным износом резьбообразующего инструмента;
- 3) погрешности, порождаемые колебанием температуры заготовки;
- 4) погрешности настройки станка;
- 5) погрешности, вызываемые неточностью изготовления резьбообразующего инструмента.

Расчет и анализ отклонений погрешностей, возникающих при изготовлении резьбовых деталей на станках, осуществляется двумя методами: расчетно-аналитическим и статистическим [2].

При статистическом методе суммарная погрешность определяется непосредственно (без анализа первичных погрешностей) путем измерения некоторого числа деталей и обработки результатов измерения с помощью методов математической статистики.

Расчетно-аналитический метод основан на проведении теоретических и экспериментальных исследований, имеющих целью выявить первичные погрешности и установить функциональную зависимость между той или иной погрешностями и факторами, их порождающими. Суммарная погрешность при расчетно-аналитическом методе определяется в зависимости от характера и взаимодействия первичных погрешностей.

Расчетно-аналитический метод по сравнению со статистическим обладает тем преимуществом, что, при использовании этого метода, предоставляется возможность одновременного анализа технологического процесса и изыскания методов воздействия на него, с целью достижения требуемой точности.

Рядом исследователей предлагались различные методики для прогнозирования точности резьб, получаемых различными способами накатывания. В работе [2] предложена формула для расчета погрешности среднего диаметра резьбы, накатываемой роликами:

$$\Delta d_2 = \Delta_j d_2 - \Delta_{зам}, \quad (2.1)$$

где Δd_2 - погрешность среднего диаметра готовой резьбы,

$$\Delta_j d_2 = \frac{P}{j_{сист}},$$

P - радиальное усилие накатывания, $j_{сист}$ - коэффициент жесткости упругой системы «станок – приспособление – инструмент - деталь», $\Delta_{зам}$ - предварительная деформация, позволяющая выбрать зазоры и повысить жесткость упругой системы.

Из формулы (2.1) видно, что деформация $\Delta_j d_2$ упругой системы и определяет искомую погрешность Δd_2 . Однако, очевидно, что значение коэффициента жесткости системы, а значит и слагаемого $\Delta_j d_2$ в формуле (2.1) можно учесть при настройке положения инструмента, сведя тем самым погрешность диаметра, определяемую этим слагаемым к нулю. Более правильным, было бы в качестве искомой погрешности рассматривать значение отклонения упругого смещения системы от его прогнозируемого значения

$$\Delta \Delta d_2 = \frac{\Delta P}{j_{сист}}, \quad (2.2)$$

где ΔP - изменение усилия накатывания, вызванное колебаниями технологических факторов процесса накатывания. Поскольку значение усилия накатывания зависит от значений этих факторов, то при наличии установленной непрерывной дифференцируемой функциональной зависимости между ними и при малых значениях отклонений параметров, значение ΔP в формуле (4.2) можно рассматривать как полный дифференциал функции P .

В работе [7] приведены результаты экспериментальных и теоретических исследований проблем повышения точности накатываемой резьбы. Выявлены

факторы, влияющие на точность резьбы: колебание диаметра стержня заготовки; колебания упругих деформаций системы «станок-инструмент»; колебания температуры инструмента и сопрягаемых с ним деталей; нестабильность наладки; износ накатного инструмента. Приведены эмпирические формулы для расчетов случайных погрешностей, возникающих в результате колебаний вышеотмеченных факторов. Однако, применяемые методы определения случайных погрешностей базируются на упрощенных подходах и не обеспечивают требуемую точность.

В работах [8-10] рассмотрены некоторые вопросы, касающиеся повышения качества и точности резьб, накатываемых двумя роликами и инструментом «ролик-сегмент». При этом проведен анализ влияния различных факторов, таких как глубины вдавливания инструментов, жесткости оборудования и др. на точность и качество накатанной резьбы. Отмечено, что при проектировании накатного инструмента необходимо определять усилие вдавливания инструментов в заготовку, однако не предложено никаких методов для его расчета и тем более не приведено никаких функциональных зависимостей усилия от параметров процесса накатывания.

В связи с вышесказанным, очевидной является необходимость разработки методики, позволяющей с высокой точностью рассчитывать величину погрешностей диаметров резьб, получаемых накатыванием, которые образуются в результате колебаний наиболее характерных реологических, геометрических, механических и технологических факторов процесса накатывания. При этом необходимым является наличие непрерывных дифференцируемых функциональных зависимостей усилия от этих факторов.

Точность резьбы зависит от колебаний различных факторов процесса накатывания (размеры заготовки, механические свойства материала накатываемой заготовки, условия трения, температура и т.п.), а также жесткости силовой системы «станок – инструмент – заготовка». На стадии проектирования технологического процесса накатывания резьбы необходимо прогнозировать влияние этих колебаний на погрешности геометрических размеров

получаемых резьб. В не меньшей мере точность готовых изделий зависит и от совершенства конструкции накатного инструмента, профиль которого должен идеально соответствовать профилю получаемой резьбы. Поэтому очевидна необходимость разработки математических моделей и методов, применение которых к расчетам процессов накатывания, позволит с высокой точностью определять энергосиловые параметры резьбонакатывания, что позволит правильно прогнозировать точность накатываемой резьбы и износостойкий накатного инструмента.

2.1.2. Жесткость резьбонакатных станков

Точность накатанной резьбы существенно зависит от жесткости системы «станок - инструмент- заготовка». Жесткость отдельных деталей или групп деталей есть способность упруго деформироваться под действием внешних сил на малую величину.

Под жесткостью резьбонакатных станков обычно подразумевают жесткость деталей (станина, ползун, инструмент, инструментодержатель и т. п.), замыкающих усилие, действующее со стороны накатываемой заготовки на инструмент перпендикулярно плоскости его движения [7]. При исследовании жесткости резьбонакатных станков рассматривают жесткость отдельных деталей, систем (групп) деталей, стыков деталей (контактные деформации), а также общую жесткость автомата.

В общем случае жесткость резьбонакатного станка можно определить по графику изменения расстояния между плашками d в зависимости от радиальной силы накатывания N , действующей на инструмент перпендикулярно плоскости движения (рис. 2.1).

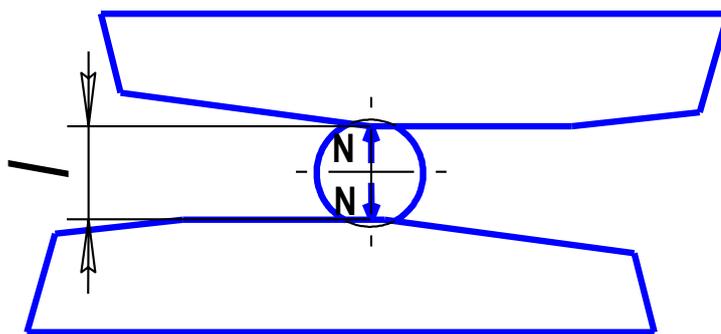


Рис. 2.1. К расчету жесткости резьбонакатного станка

Количественно жесткость станка выражается коэффициентом жесткости, значение которого в общем случае определяется по формуле

$$C = \frac{dN}{dd} \quad (2.3)$$

Как правило, зависимость между усилием N и расстоянием d линейна и коэффициент жесткости является постоянной величиной. В данной работе он также полагается постоянным. Связь между жесткостью машины и жесткостью его отдельных деталей, воспринимающих нагрузку от накатки, определяется зависимостью

$$\frac{1}{C} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i}, \quad (2.4)$$

где C_i - коэффициент жесткости i -ой детали.

Часто силовая система «станок-инструмент-заготовка» рассматривается как совокупность собственно станка с жесткостью C_0 и инструмента, жесткость которого C_u . В этом случае общая жесткость силовой системы определяется как

$$C = \frac{C_0 C_u}{C_0 + C_u} \quad (2.5)$$

Комплексные исследования жесткости кузнечно-прессовых машин проводились в ЭНИКМАШе (г.Воронеж) в 70-80 годы прошлого века [11,12]. При определении жесткости машин в основном использовались два метода:

1. Метод замера деформаций упругой системы при её статическом нагружении специальными силовыми нагрузителями, например гидравлическими, с замером деформаций индикаторами.

2. Метод крешеров. Крешеры – специальные образцы, как правило, в виде цилиндров. Осаживая крешеры на лабораторных испытательных машинах, вначале строят тарировочный график $P = f(\Delta h)$. Затем образцы деформируют в рабочем режиме на машине, для которой необходимо определить жесткость силовой системы, и по остаточной деформации с использованием тарировочного графика определяют коэффициент жесткости. Метод крешеров позволяет определять жесткость силовой системы машины с учетом динамики процесса деформирования.

В работе [7] приведены рекомендуемые минимально допустимые коэффициенты радиальной жесткости резбонакатных автоматов с плоскими плашками для холодной накатки резьбы, которые представлены в табл.1.1.

Таблица 1.1

Минимально допустимые коэффициенты радиальной жесткости автоматов с плоскими плашками для различных диаметров накатываемой резьбы

Диаметр резьбы, мм	4	6	10	16	24
Коэффициент жесткости, кН/мм	80	125	200	315	500

2.1.3. Основы методика определения случайных погрешностей накатанной резьбы

Решению проблемы повышения точности изделий при их штамповке на механических и гидравлических прессах посвящены работы Е.Н.Ланского, Ю.А.Миропольского, М.И.Писаревского, Е.Д.Бродского, В.И.Силанова, А.Я.Нузова, А.З.Журавлева и др. [13 – 18, 22-23].

Для оценки точность штампуемых изделий предлагается определять полное поле рассеивания Δh размера в направлении действия деформирующего усилия (высота штампуемого изделия)

$$\Delta h = \Delta h_3 + \frac{1}{2} \Delta h_c \quad , \quad (2.6)$$

где Δh_3 - суммарная закономерная погрешность;

Δh_c - суммарная случайная погрешность.

Закономерные погрешности связаны с износом инструмента, температурными колебаниями, потерей настройки, ослаблением креплений деталей в узлах и звеньях машины и т.п. В каждом конкретном случае эти погрешности могут быть устранены соответствующей подналадкой оборудования.

Случайные погрешности являются результатом колебаний усилий деформирования вследствие колебаний размеров (d_0, h_0) исходной заготовки и сопротивления деформации σ_s штампуемого металла, условий трения μ и других технологических факторов.

Для определения случайных погрешностей при штамповке изделий на многопозиционных кривошипных прессах, когда точность штампуемого изделия определяется стабильностью крайнего положения инструмента, рассматривались деформации в общей технологической системе “машина- инструмент - заготовка”, которую можно представить как совокупность упругих и пластических звеньев.

Упругие звенья - это детали и узлы кузнечно-прессовой машины. При усилиях, близких к номинальным (на конечном этапе деформирования), деформации упругих звеньев можно рассматривать как линейные функции усилий, действующих на систему пресс-инструмент.

Пластические звенья - это заготовки, полуфабрикаты, готовые изделия. Деформирующие усилия пластических звеньев могут быть определены методами теории ОМД в виде некоторой дифференцируемой функции $P_{i \dot{a} \ddot{u}} = \varphi(d_0, h_0, h_i, \sigma_s, \mu \dots)$. При этом методика определения усилий должна быть достаточно чувствительна к колебаниям размеров d_0, h_0 , сопротивления деформации σ_s штампуемого металла, условий трения μ и т.п. Так как именно первичные погрешности этих технологических факторов приводят к колебаниям деформирующих усилий, а следовательно, и к отклонениям от номинальных значений высоты штампуемого элемента изделия.

Совместное решение уравнений деформации упругих и пластических звеньев общей технологической системы “машина - инструмент - заготовка” и линеаризацию полученных зависимостей, путем разложения в ряд по малым приращениям независимых параметров $d_0, h_0, h_i, \sigma_s, \mu \dots$ дает систему уравнений, используя которые можно определять случайные погрешности высоты штампуемого элемента при колебании начальных параметров

$$\Delta h_{id_0} = \frac{\frac{\partial \varphi}{\partial d_0} \Delta d_0}{C - \frac{\partial \varphi}{\partial h_i}} ; \quad \Delta h_{ih_0} = \frac{\frac{\partial \varphi}{\partial h_0} \Delta h_0}{C - \frac{\partial \varphi}{\partial h_i}}$$

$$\Delta h_{i\sigma} = \frac{\frac{\partial \varphi}{\partial \sigma} \Delta \sigma}{C - \frac{\partial \varphi}{\partial h_i}} \quad \Delta h_{i\mu} = \frac{\frac{\partial \varphi}{\partial \mu} \Delta \mu}{C - \frac{\partial \varphi}{\partial h_i}} \quad (2.7)$$

В работах [19, 20] вышеотмеченную методику использовали для расчета случайных погрешностей и параметров рациональной настройки при холодной штамповки болтов на одно- и четырехпозиционных прессах-автоматах, а также при изготовлении стержневых крепежных изделий на роторных линиях и высадочно-прокатных машинах [21].

Вышеотмеченный подход с дополнительными уточнениями и изменениями применен для расчета погрешностей резьб, получаемых накатыванием. В данном случае роль деформирующего усилия играет радиальная составляющая N усилия накатывания. Ниже приведено краткое изложение методики, примененной в данной работе.

На рис. 2.2. представлена схема упругой системы “станок – инструмент – заготовка” при накатывании резьбы плоскими плашками, которая характеризуется жесткостью станка C_0 и жесткостью инструмента C_u . Общая жесткость силовой системы определяется, используя выражение (2.5).

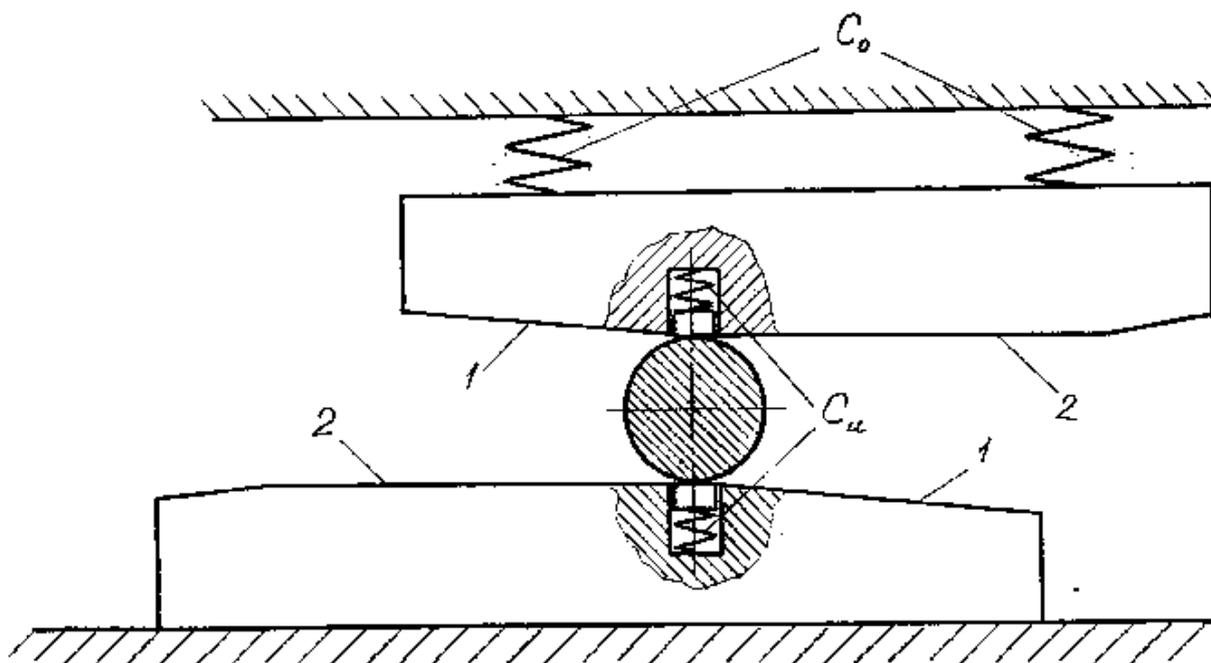


Рис. 2.2. Схема упругой системы “станок –инструмент-заготовка” при накатывании резьбы

На основании анализа известных исследований [7-10, 23-24], установлено, что наибольшее влияние колебание радиальной силы накатывания влия-

ют колебания предела текучести σ_0 материала заготовки, температура T , коэффициент трения μ , диаметр d_0 и длина L участка заготовки под накатку. Максимальная радиальная сила N , деформирующая заготовку на конечном этапе накатывания, является функцией параметров σ_0, T, μ, d_0, L и текущего расстояния между плашками d :

$$N = f(\sigma_0, T, \mu, d_0, L, d). \quad (2.8)$$

В качестве значения расстояния d в данной работе использовалось значение внутреннего диаметра резьбы d_1 . Необходимым условием является непрерывность и дифференцируемость функции (2.8) в области изменения ее аргументов.

Рассматривая деформации упругих и пластических звеньев общей технологической системы “станок - инструмент - заготовка” для случая накатки плоскими плашками (рис.2.2), получено

$$\frac{N}{C_0} + \frac{N}{C_u} = d - D, \quad (2.9)$$

где d - расстояния между рабочими поверхностями плашек при действии технологических усилий на конечном этапе резьбонакатывания;

D - расстояния между рабочими поверхностями плашек при отсутствии деформирующих усилий и зазоров в системе.

После преобразований с учетом (2.5) получено

$$N = C(d - D) \quad (2.10)$$

Методами теории ОМД устанавливается аналитическая зависимость

$$N = f(\sigma_0, T, \mu, d_0, L, d) \quad (2.11)$$

Тогда, исключая N из уравнений (2.10) и (2.11) и перенося оба члена в правую часть, получено

$$F = f(\sigma_0, T, \mu, d_0, L, d) - C(d - D) \quad (2.12)$$

Предполагая по смыслу $C = \text{const}$ и $D = \text{const}$, проводится линейризацию уравнения (2.12), путем разложения в ряд по малым приращениям независимых параметров $(\sigma_0, T, \mu, d_0, L, d)$. При достаточно стабильном технологическом процессе диапазон изменения отдельных переменных сравнительно невелик и можно ограничиться одним членом ряда [14]. Последовательно приравнивая к нулю приращения всех параметров, кроме одного, получены зависимости, по которым можно определять случайные погрешности диаметра накатываемой резьбы при колебании:

- сопротивления деформации материала заготовки σ_0

$$\Delta d_\sigma = \frac{\frac{\partial f}{\partial \sigma_0} \Delta \sigma_0}{C - \frac{\partial f}{\partial d}} ; \quad (2.13)$$

- температуры нагрева накатываемой заготовки

$$\Delta d_T = \frac{\frac{\partial f}{\partial T} \Delta T}{C - \frac{\partial f}{\partial d}} ; \quad (2.14)$$

- коэффициента трения

$$\Delta d_\mu = \frac{\frac{\partial f}{\partial \mu} \Delta \mu}{C - \frac{\partial f}{\partial d}} ; \quad (2.15)$$

- диаметра исходной заготовки

$$\Delta d_{d_0} = \frac{\frac{\partial f}{\partial d_0} \Delta d_0}{C - \frac{\partial f}{\partial d}} ; \quad (2.16)$$

- длины исходной заготовки

$$\Delta d_L = \frac{\frac{\partial f}{\partial L} \Delta L}{C - \frac{\partial f}{\partial d}} . \quad (2.17)$$

Расчет случайных погрешностей диаметра накатываемой резьбы при колебании параметров $(\sigma_0, T, \mu, d_0, L, d)$ предлагается осуществлять в следующей последовательности.

1. Используя какой-либо точный и надежный метод теории ОМД, определяются радиальные усилия накатки в зависимости от параметров $(\sigma_0, T, \mu, d_0, L, d)$. В частности, рекомендуется применять метод конечных элементов (МКЭ), который положен в основу хорошо апробированных программных комплексах, например, «DEFORM», «MARK/Auto Forge», «QFORM», «ANSYS» и др.

2. Определяется реальный диапазон колебаний технологических параметров $(\sigma_0, T, \mu, d_0, L, d)$. Используя выбранный программный комплекс, определяются радиальные усилия N в зависимости от каждого параметра в нескольких точках диапазона его изменения.

3. Строятся графики изменения радиального усилия N от каждого из параметров $(\sigma_0, T, \mu, d_0, L, d)$. Полученные кривые аппроксимируются уравнениями $N = f(\sigma_0)$, $N = f(T)$, $N = f(\mu)$, $N = f(d_0)$, $N = f(L)$, $N = f(d)$. Для определения коэффициентов аппроксимирующих уравнений рекомендуется использовать программный комплекс «Excel».

4. Определяются частные производные уравнений (2.13-2.17) $\frac{\partial f}{\partial \sigma_0}$,

$\frac{\partial f}{\partial T}$, $\frac{\partial f}{\partial \mu}$, $\frac{\partial f}{\partial d_0}$, $\frac{\partial f}{\partial L}$, $\frac{\partial f}{\partial d}$ и вычисляются их значения в средней точки

диапазона изменения каждого параметра $(\sigma_0, T, \mu, d_0, L, d)$. (??)

5. Используя уравнения (2.13-2.17), определяются случайные погрешности диаметра накатываемой резьбы Δd_σ , Δd_T , Δd_μ , Δd_{d_0} , Δd_L при колебании технологических параметров $(\sigma_0, T, \mu, d_0, L, d)$ и вычисляется общая случайная погрешность, по которой оценивается точность накатываемой резьбы.. Так как случайные погрешности диаметра накатываемой резьбы Δd_σ , Δd_T , Δd_μ , Δd_{d_0} , Δd_L , вызванные колебаниями технологических параметров, являются случайными величинами, то они суммируются по правилам сложения случайных величин, то есть геометрически

$$\Delta d = \sqrt{\sum \Delta d_i^2} \quad (2.18)$$

Если суммарная случайная погрешность меньше допуска $[\Delta d]$ на внутренний диаметр, который регламентируется соответствующей нормативно-технической документацией (ГОСТ, ТУ и др.), то процесс считается стабильным. При $\Delta d > [\Delta d]$ необходимо применять какие-либо мероприятия по повышению стабильности.

На рис. 2.3 представлена общая структура модели прогнозирования точности накатываемой резьбы. В модели предусмотрена возможность оказывать влияние на точность накатываемой резьбы. В случае, если общая погрешность Δd превышает допустимые значения $[\Delta d]$, то возможно снижение общей погрешности, во-первых, за счет уменьшения диапазонов колебания технологических параметров $\Delta \sigma_0, \Delta T, \Delta \mu, \Delta d_0, \Delta L, \Delta d$, во-вторых, за счет увеличения жесткости C силовой системы “станок - инструмент - заготовка”.

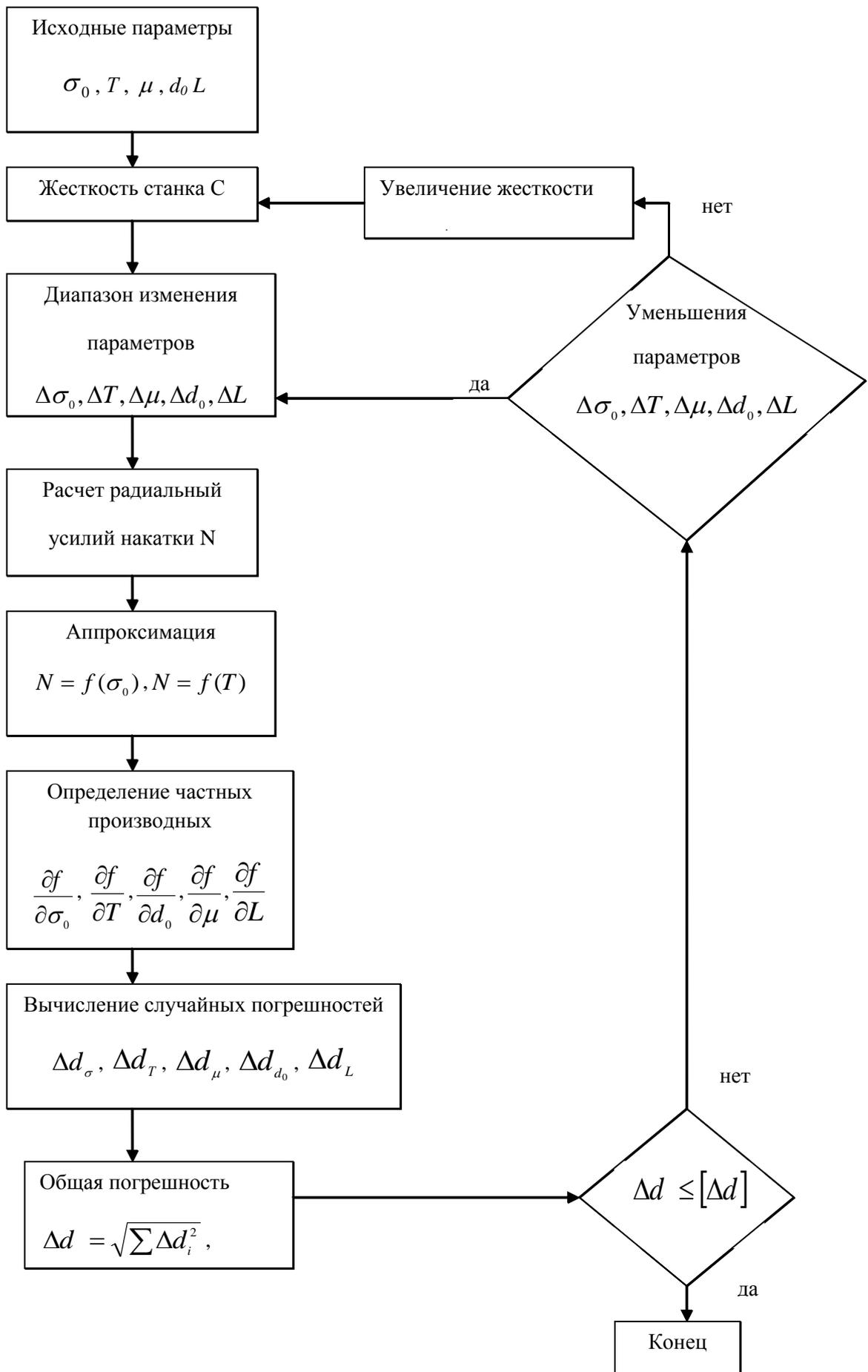


Рис.2.3. Общая структура модели прогнозирования точности при накатке

2.1.4. Прогнозирование точности резьбы путевых шурупов, формируемой накаткой плоскими плашками

Методику прогнозирования точности накатанных резьб использовали для оценки точности резьбы путевых шурупов (рис.2.4, 2.5) при ее формировании горячим накатыванием плоскими плашками.

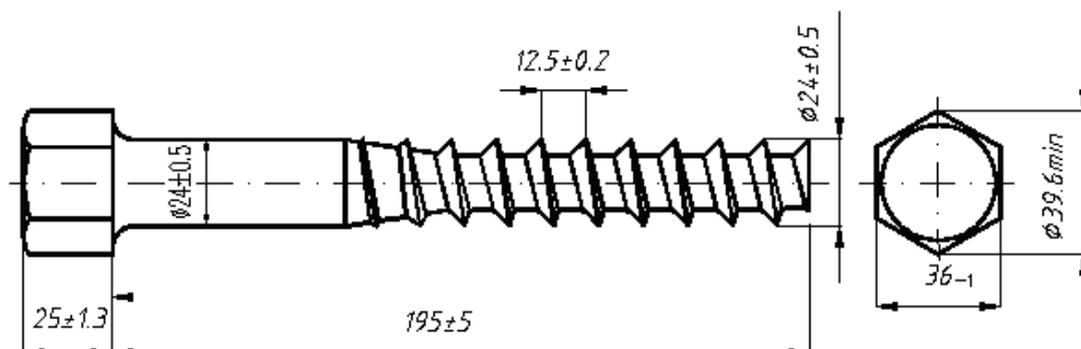


Рис.2.4. Шуруп путевой ЦП-65 с шестигранной головкой (ТУ 1293-165-01124323-2005, ТУ 14-176-133-2004)

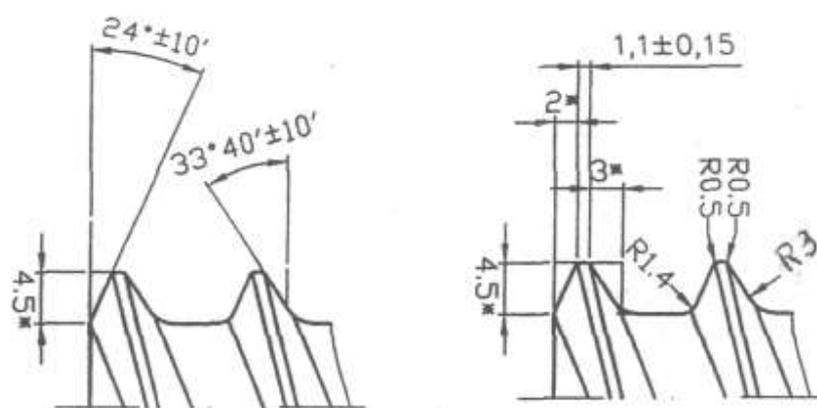


Рис.2.5. Резьба путевых шурупов

При моделировании процесса накатки путевых шурупов ЦП-65 и определении радиальных усилий N накатывания колебания технологических параметров (σ_0, T, μ, d_0, L) задавали в следующих диапазонах:

- базисное сопротивление деформации $\sigma_0 = 80 \div 90$ МПа;
- диаметр исходной заготовки под накатку $d_0 = 21,2 \div 21,8$ мм;
- температура нагрева заготовки $T = 900 \div 1100^\circ\text{C}$;
- коэффициент трения $\mu = 0,2 \div 0,4$;
- длина исходной заготовки под накатку $L = 75 \div 85$ мм.

Используя программный комплекс «DEFORM-3D», в основу которого положен метод конечных элементов, выполнено моделирование процесса накатки резьбы путевого шурупа. Схема процесса накатки представлена на рис. 2.6.

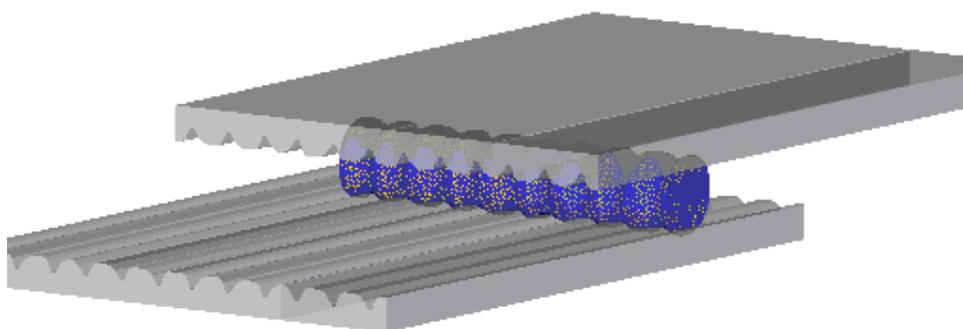


Рис.2.6. Положение инструмента и заготовки на промежуточном этапе накатки резьбы путевого шурупа

На основании выполненных расчетов определены радиальные усилия N накатки и построены кривые зависимости N от параметров $\sigma_0, T, \mu, d_0, L, d$ (рис.2.7-2.11).

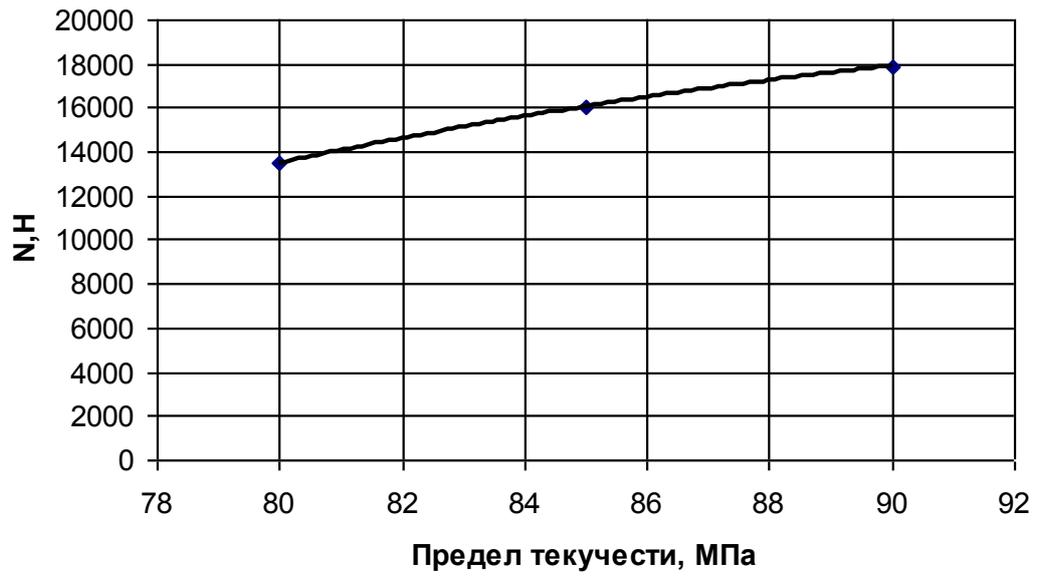


Рис.2.7. Изменение радиальной силы N накатывания при изменении исходного предела текучести σ_0 материала заготовки при накатке одного витка

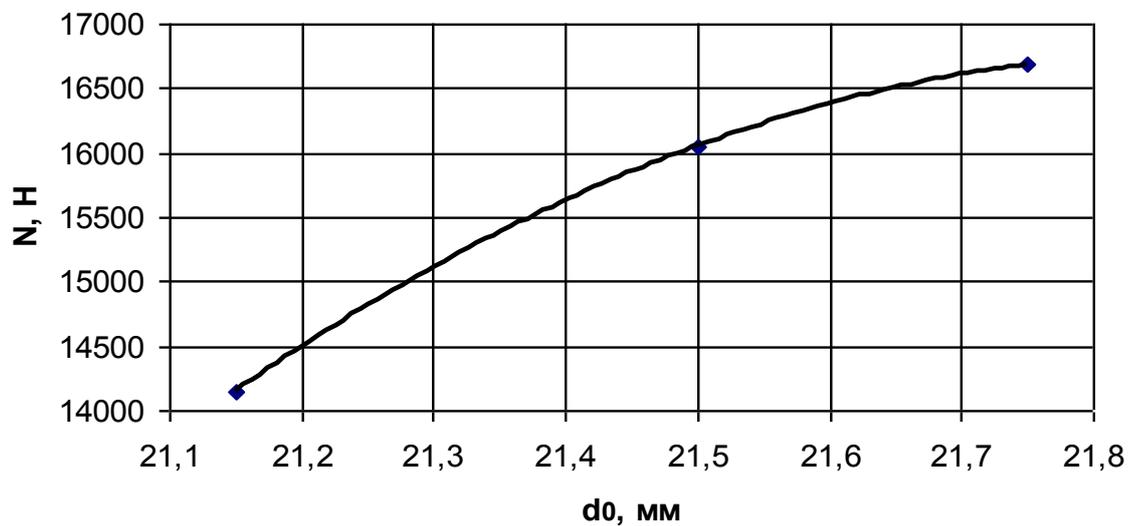


Рис.2.8. Изменение радиальной силы N накатывания при изменении диаметра исходной заготовки d_0 при накатке одного витка

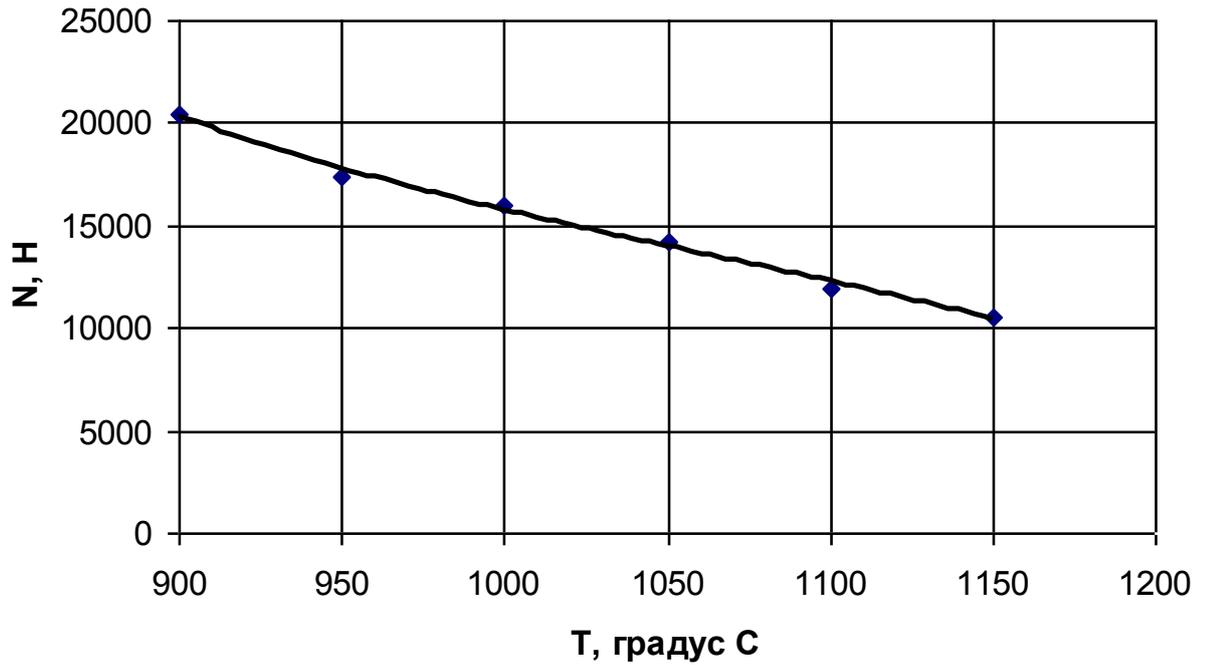


Рис.2.9. Изменение радиальной силы N накатывания при изменении температуры T при накатке одного витка

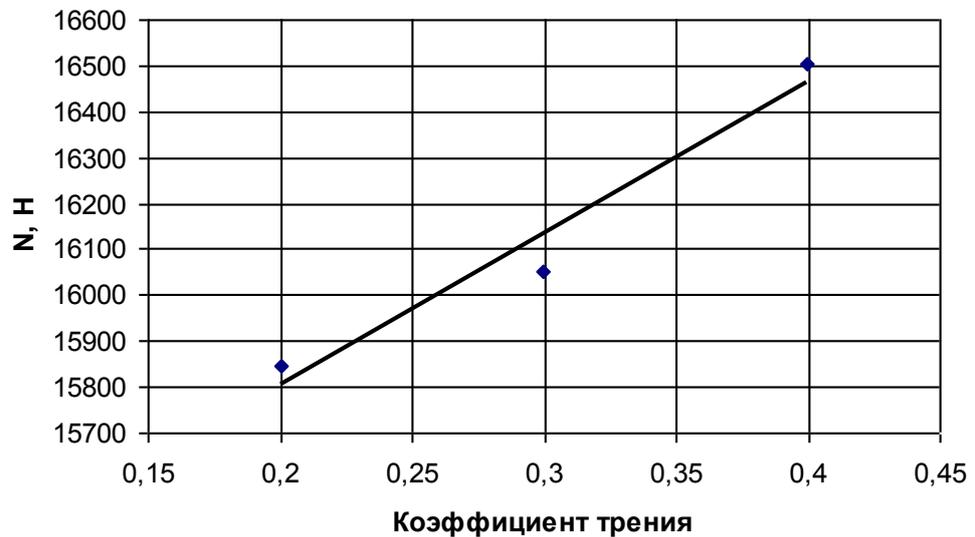


Рис.2.10. Изменение радиальной силы N накатывания при изменении коэффициента трения μ при накатке одного витка

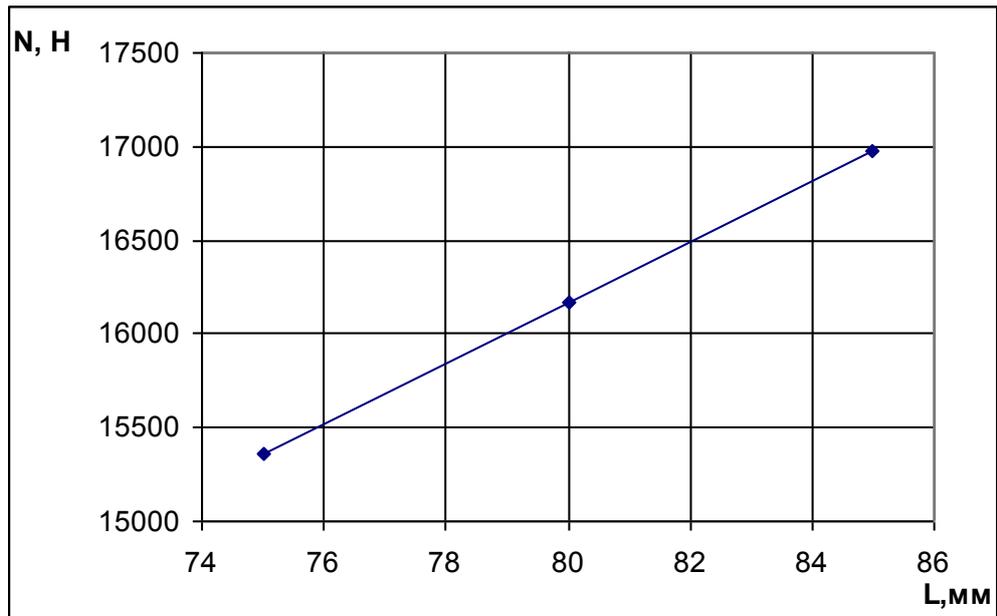


Рис.2.11. Изменение радиальной силы N накатывания при изменении длины исходной заготовки L при накатке одного витка

Используя программный комплекс «Excel», кривые (2.7 – 2.11) аппроксимировались аналитическими зависимостями. При этом получено:

для $N = f(\sigma_0)$

$$N = -14,56 \sigma_0^2 + 2916,3 \sigma_0 - 126642 \quad (\text{коэффициент корреляции } R^2 = 0,995);$$

для $N = f(T)$

$$N = -0,0003 T^3 + 0,8986 T^2 - 990,94 T + 389278 \quad (R^2 = 0,9936);$$

для $N = f(d_0)$

$$N = 13,69 d_0^2 - 84,71 d_0 + 11143 \quad (R^2 = 0,981);$$

для $N = f(\mu)$

$$N = 3302,9 \mu + 15143 \quad (R^2 = 0,9567);$$

для $N = f(L)$

$$N = 162,1 L + 3211 \quad (R^2 = 0,967)$$

Определялись частные производные уравнений (2.13-2.17)

$$\frac{\partial f}{\partial \sigma_0} = -29,12 \sigma_0 + 2916,3 ;$$

$$\frac{\partial f}{\partial T} = -0,0009 T^2 + 1,7972 T - 990,94 ;$$

$$\frac{\partial f}{\partial d_0} = 27,38 d_0 - 84,71 ;$$

$$\frac{\partial f}{\partial \mu} = 3302,9 ;$$

$$\frac{\partial f}{\partial L} = 162,1$$

и вычисляются их значения в средней точки диапазона изменения каждого параметра $(\sigma_0, T, \mu, d_0, L, d)$. (??)

Используя уравнения (2.13-2.17), определялись случайные погрешности диаметра накатываемой резьбы $\Delta d_\sigma, \Delta d_T, \Delta d_\mu, \Delta d_{d_0}, \Delta d_L$ при колебании технологических параметров $(\sigma_0, T, \mu, d_0, L, d)$..

На рис. 2.12 – 2.16 построены графики зависимостей погрешностей резьбы путевых шурупов из стали марки 20, накатанных в горячем состоянии, в зависимости от коэффициента жесткости системы «станок - инструмент- заготовка», который варьировался в пределах 300...700 кН/мм.

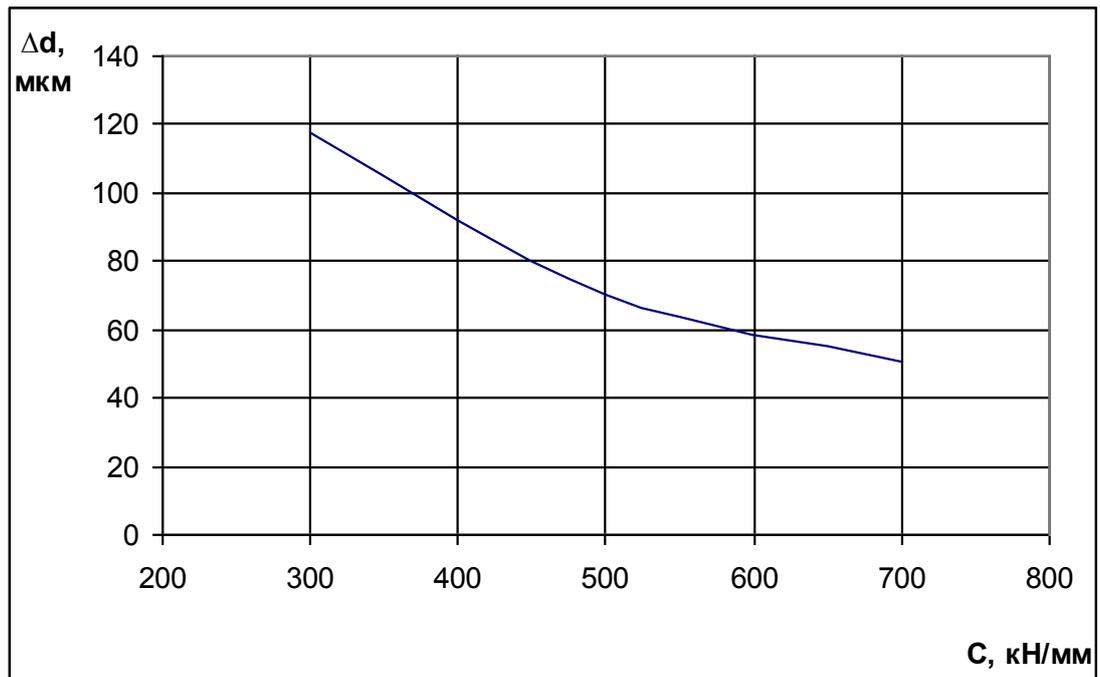


Рис. 2.11. Погрешность внутреннего диаметра резьбы Δd_σ в зависимости от жесткости резьбонакатного станка при отклонении базисного сопротивления деформации σ_0 в пределах $75 \div 85$ МПа

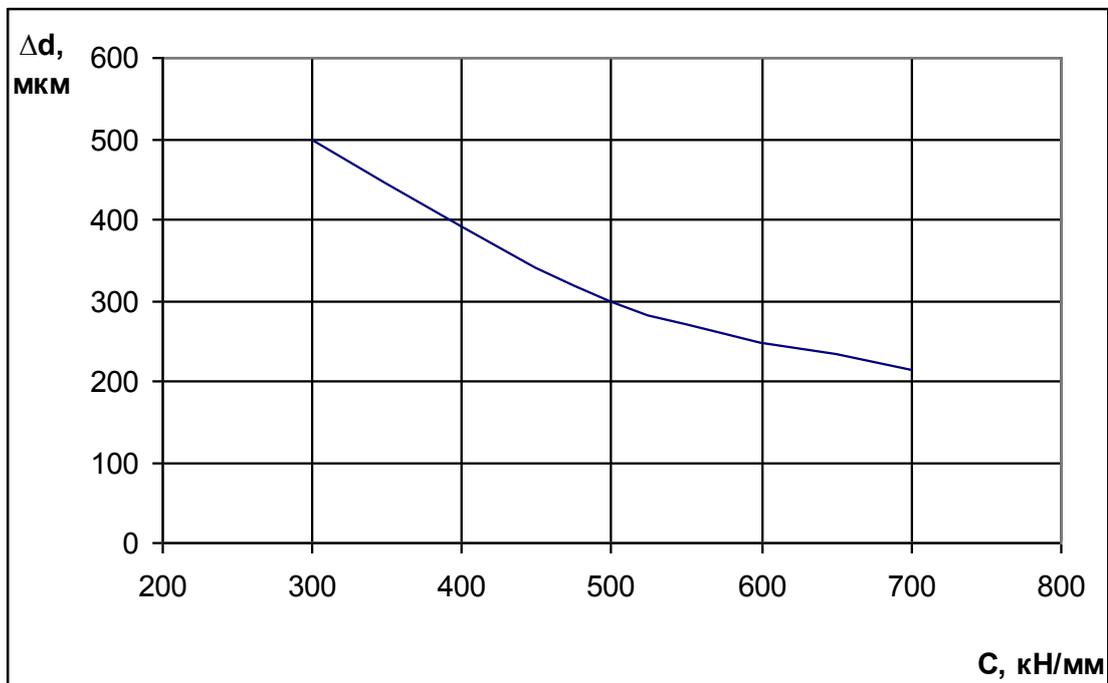


Рис. 2.14. Погрешность Δd_T внутреннего диаметра резьбы в зависимости от жесткости резьбонакатного автомата при отклонении температуры T заготовки в пределах $900 \div 1100^\circ \text{C}$

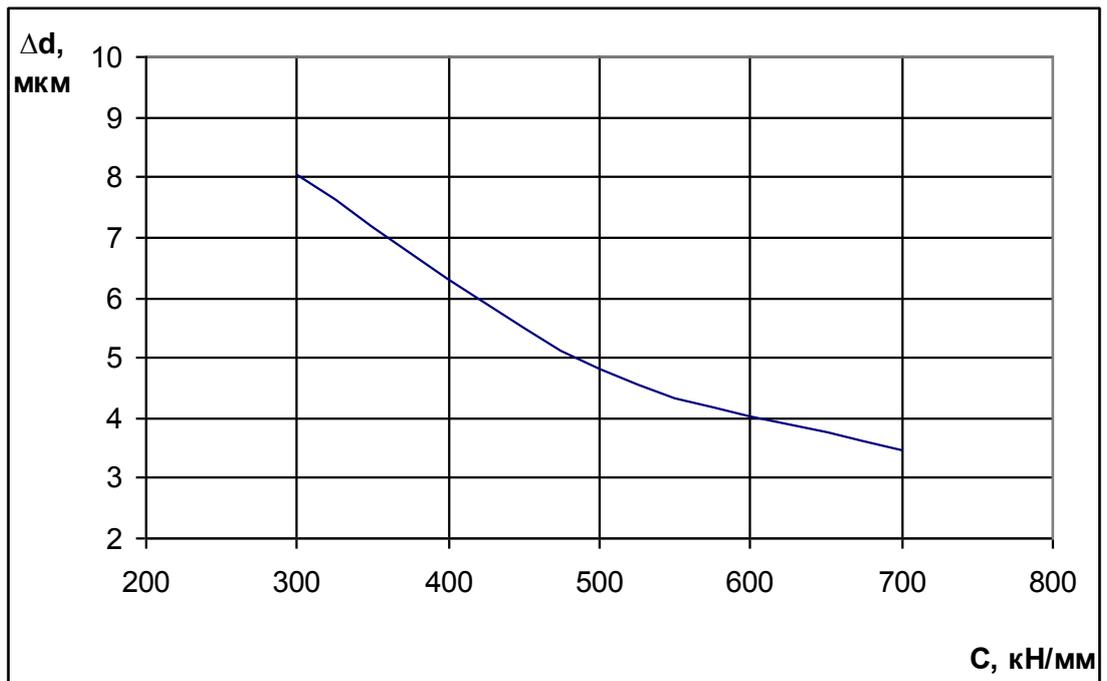


Рис. 2.12. Погрешности Δd_{d_0} внутреннего диаметра резьбы в зависимости от жесткости резьбонакатного станка при отклонении диаметра d_0 заготовки в пределах $21,2 \div 21,8$ мм

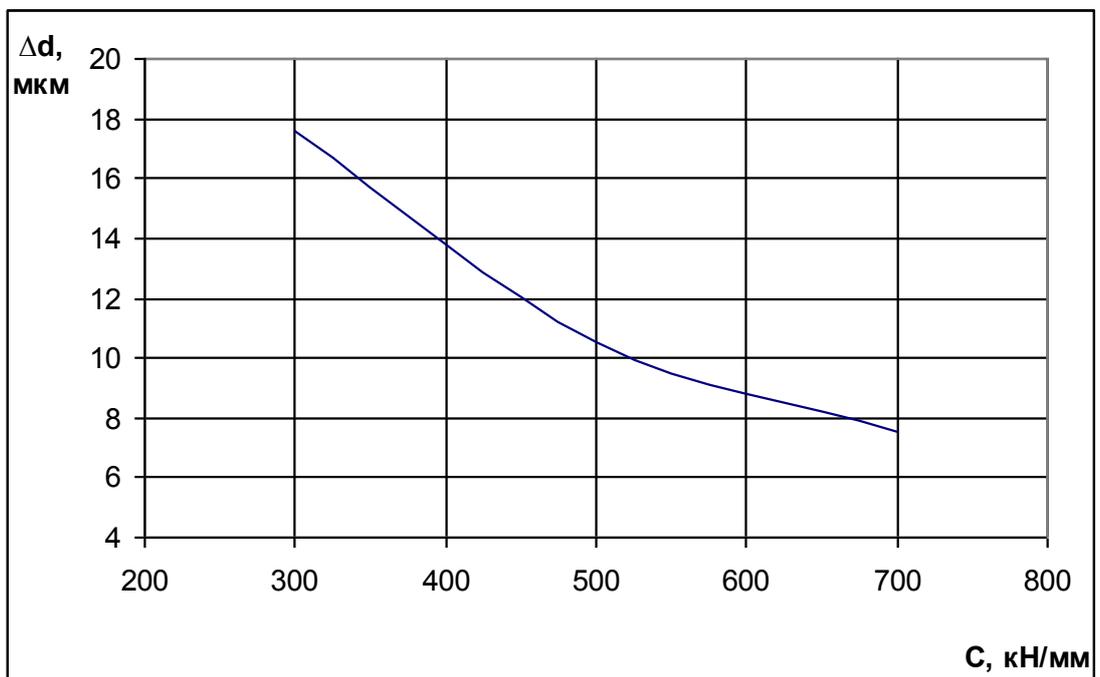


Рис. 2.13. Погрешность Δd_{μ} внутреннего диаметра резьбы в зависимости от жесткости резьбонакатного станка при отклонении коэффициента трения μ в пределах $0,2 \div 0,4$

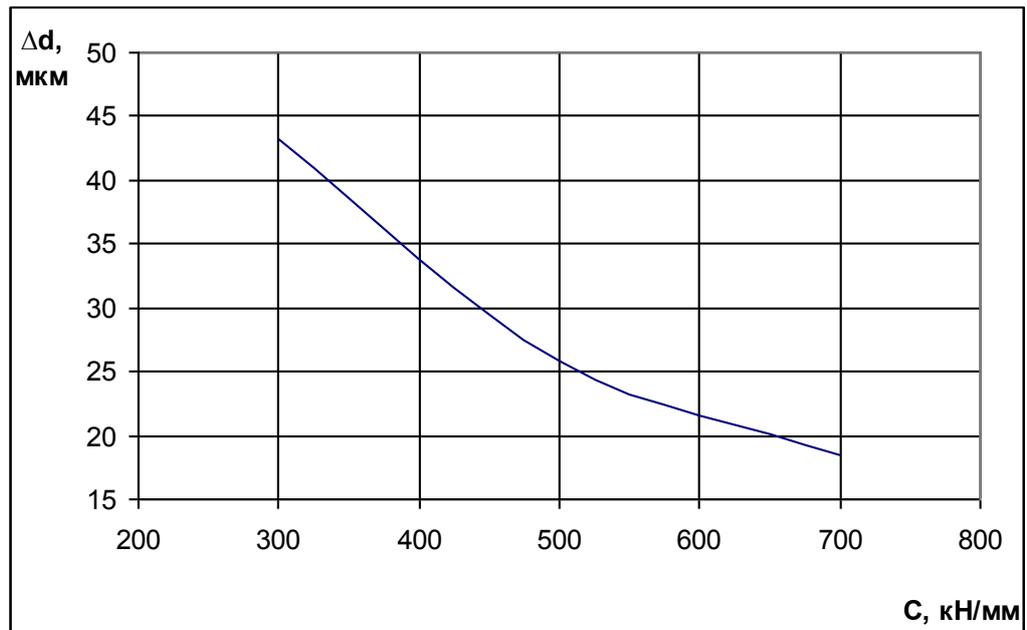


Рис. 2.15. Погрешность Δd_L внутреннего диаметра резьбы от жесткости резбонакатного автомата при отклонении длины L исходной заготовки в пределах $75 \div 85$ мм

Анализируя полученные данные, можно сделать следующие выводы:

1. Колебания внутреннего диаметра резьбы путевых шурупов наиболее чувствительны к колебаниям температуры T нагрева и базисного сопротивления деформации σ_0 . Колебания коэффициента трения μ и диаметра d_0 исходной заготовки влияют на колебания внутреннего диаметра резьбы незначительно.

2. Расчеты, выполненные для процесса накатки резьбы путевого шурупа ЦП-65 (ТУ 14-176-133-2004) из стали марки 20 плоскими плашками на резбонакатном станке А2424 (завод «Тяжпрессмаш», г. Рязань), показали, что при коэффициенте жесткости $C = 500$ кН/мм суммарная погрешность внутреннего диаметра накатанной резьбы не выходит за пределы регламентированного допуска: $[-500$ мкм, $+500$ мкм].

2.2. Разработка методики прогнозирования износостойкости инструмента для накатки резьбы.

2.2.1. Основы методики прогнозирования износостойкости

«Износостойкость - свойство материала оказывать сопротивление изнашиванию в определенных условиях трения, оцениваемое величиной, обратной скорости изнашивания или интенсивности изнашивания». «Изнашивание – процесс отделения материала с поверхности твердого тела и (или) увеличение его остаточной деформации при трении, проявляющийся в постепенном изменении размеров и (или) формы» [41].

Износ инструмента для накатки резьбы (плашки, ролики, сегменты и т.п.) определяется условиями взаимодействия инструмента с накатываемой заготовкой. Он зависит от технологических и конструктивных факторов.

К технологическим факторам относятся:

- величина и характер распределения давлений на контактной поверхности;
- величина и распределение температуры на контактной поверхности инструмента;
- геометрические и кинематические параметры процесса накатки (размеры очага деформации, скорость накатки и скорость проскальзывания заготовки относительно инструмента и др.);
- количество накатанных изделий.

К конструктивным факторам относятся:

- конструктивное исполнение инструмента, его форма и размеры;
- материал резьбонакатного инструмента;
- коэффициент трения f на контакте инструмента с заготовкой;
- шероховатость рабочей поверхности инструмента.

Вышеуказанные факторы взаимосвязаны друг с другом. Например, температура на контактной поверхности леек зависит от температуры накатываемой заготовки и интенсивности охлаждения инструмента. На коэффициент трения влияет температура контактной поверхности. Она зависит и

от конструктивных особенностей инструмента, которые могут оказывать существенное влияние на процесс теплообмена.

Из всего многообразия факторов, влияющих на изнашивание, наиболее значимыми являются силовое взаимодействие в системе «инструмент-заготов-ка», скорость скольжения и температура.

При росте сил контактного давления увеличивается глубина внедрения одного материала в другой, что ведет к нарушению фрикционных связей и к переходу от упругого контакта к пластическому деформированию и далее к микрорезанию или задиру;

Скорость скольжения влияет на изменение свойств поверхностных слоев и проявляется при изменении температуры на контактной поверхности. При этом изменяются модуль упругости – для упругого контакта и твердость – для пластического контакта, что влияет на величину сближения и площадь касания и соответственно изменяет изнашивание.

Температура оказывает существенное влияние на изнашивание поверхности инструмента, так как изменяет механические свойства поверхностных слоев. Под действием температуры образуется пленка окислов. Более высокие температуры ведут к разложению этих пленок, в результате чего происходит переход от пленочного изнашивания к глубинному вырыванию.

Неблагоприятные условия изнашивания инструмента создаются при мгновенных перепадах температур. Тепловые импульсы приводят к возникновению тепловые напряжения в материале, которые приводят к разрушению поверхности трения. Применительно к валковой арматуре вышесказанное означает, что для уменьшения износа, температура изнашиваемых поверхностей леек должна быть минимально возможной.

Одним из способов повышения ресурса инструмента является применение износостойких материалов.

Резьбонакатной инструмент работает в условиях интенсивного абразивного истирания рабочих поверхностей. Его износ зависит от внешних воздействий: усилий, действующих на инструмент со стороны накатываемой за-

готовки, температуры металла, скорости накатки и скорости проскальзывания, марки стали накатываемого изделия и др. В свою очередь, характер и величина износа зависят от материала, применяемого для изготовления резбонакатного инструмента.

Материалы для изготовления резбонакатного инструмента должны обладать, в первую очередь, высокой износостойкостью, коррозионностойкостью, стойкостью к циклически изменяющимся температурам. Эти материалы должны хорошо обрабатываться, обладать возможностью восстановления, иметь сравнительно небольшую стоимость.

Для изготовления резбонакатного инструмента для накатки резьбы в холодном состоянии используются легированные стали марок X12M, X12H3A, У10 и др. Инструмент для горячей накатки резьбы изготавливается из жаропрочных сталей марок 3X2Ф3М, 3X2В8Ф, 4X5МФ1С и др.

Проблемам повышения износостойкости деталей и инструмента из различных материалов посвящены работы И.В. Крагельского [25,34], Д.Н.Гаркунова [35,36] В.Н. Виноградова [26], М.М. Хрущева [27], Г.Я. Ямпольского [28], В.Н. Кащеева [29], П.Н. Львова [30], Л.И. Погодаева [31], В.М. Колокольцева [32], К.Н. Вдовина [33] и др. Многообразие критериев износостойкости свидетельствует о существенно различных подходах исследователей к объяснению и описанию механизмов изнашивания материалов.

В основу методики прогнозирования износостойкости резбонакатного инструмента положена энергетическая теория изнашивания твердых тел Крагельского-Гаркунова [25, 34, 35, 36], согласно которой объемный износ ΔW пропорционален работе сил трения A_{mp} в зоне контакта, то есть

$$\Delta W = J_{\omega} \cdot A_{mp} , \quad (2.19)$$

где J_{ω} ($\text{м}^3/\text{Дж}$) - показателя энергетической интенсивности изнашивания (ПЭИИ), который, как правило, определяется на основании эксперимен-

тальных исследований с использованием специального оборудования (машины трения).

Именно такой подход использовался в ряде работ при оценке износостойкости деталей прокатного оборудования. Используя энергетический показатель интенсивности изнашивания, в работе [37] прогнозировался износ валков для горячей прокатки листов. Модели изнашивания гладких валков и линеек валковой арматуры для бескалибровой прокатки представлены в работах [38,39].

Разработанная методика прогнозирования износостойкости резьбонакатного инструмента базируется на вышеотмеченном подходе и включает следующие этапы:

1. Рассматривается перемещение накатываемой заготовки относительно инструмента и определяется количество этапов деформирования. Например, при накатывании резьбы плоскими плашками (рис.2.16) формирование профиля резьбы практически полностью завершается в конце их заборных частей.

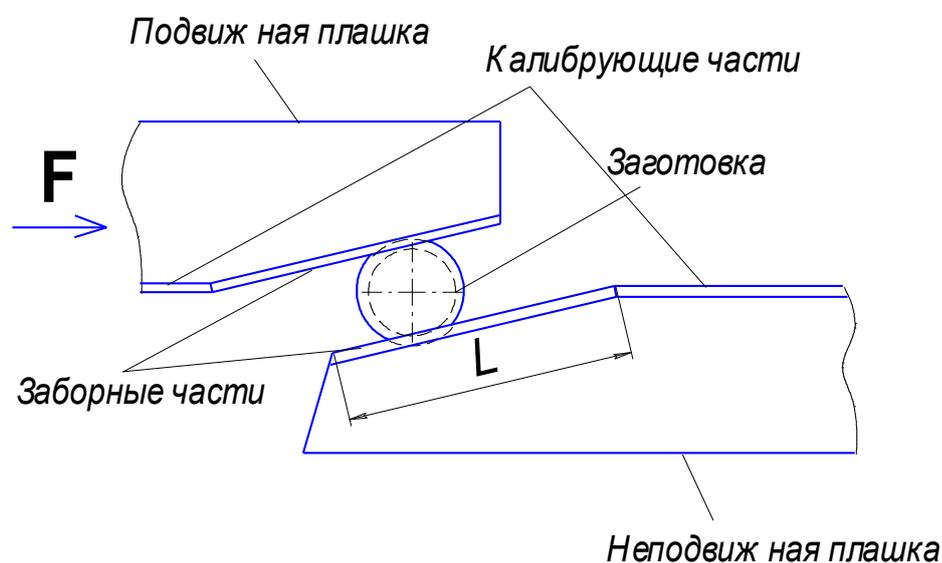


Рис. 2.16. Схема накатывания резьбы плоскими плашками

Количество оборотов заготовки вокруг своей оси, совершаемых на заборной части можно определить как отношение длины заборной части плаш-

ки L к длине окружности, диаметр которой равен среднему арифметическому значений диаметра заготовки $d_{заг}$ и внутреннего диаметра резьбы d :

$$n = \frac{2L}{\pi(d_{заг} + d)} . \quad (2.20)$$

Таким образом, образование профиля резьбы осуществляется за $2n$ этапов внедрения выступов инструмента в тело заготовки.

2. Рассматривая i -ый этап формирования впадины резьбы (рис.2.17), определяются абсолютная радиальная деформация

$$\Delta h_i = R_{i-1} - R_i , \quad (2.21)$$

где R_i - радиус поперечного сечения заготовки по впадине резьбы после деформации на i -ом этапе;

R_{i-1} - радиус заготовки на предыдущем этапе.

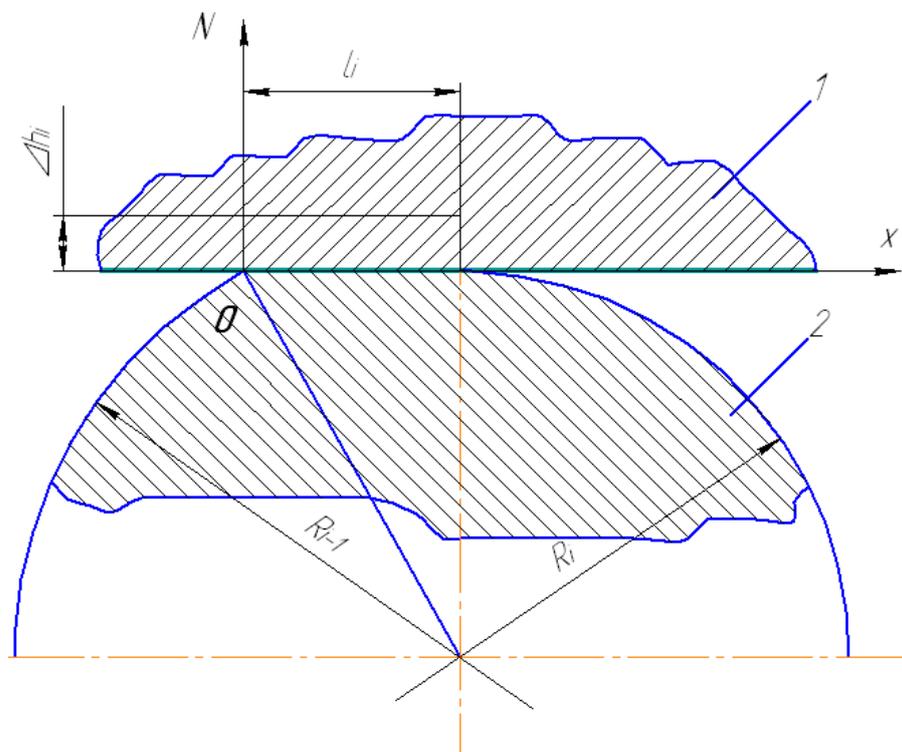


Рис. 2.17. Параметры очага деформации на i -ом этапе формирования впадины резьбы

Длина очага пластической зоны

$$l_i = \sqrt{\Delta h_i \cdot (2R_{i-1} - \Delta h_i)} . \quad (2.22)$$

3. Используя современный метод исследования процессов ОМД (например, метод конечных элементов) определяются энергосиловые параметры и напряженно-деформированное состояние в процессе накатки резьбы на каждом этапе резьбоформирования. Определяется этап, на котором эти параметры максимальны (для формирования резьбы плоскими плашками наибольшие напряжения возникают в конце заборной части). Рассматриваются касательные напряжения τ на поверхности контакта заготовки и инструмента в зоне формирования впадины резьбы. Строится график изменения касательных напряжений τ по длине пластической зоны l_i (рис. 2.18)

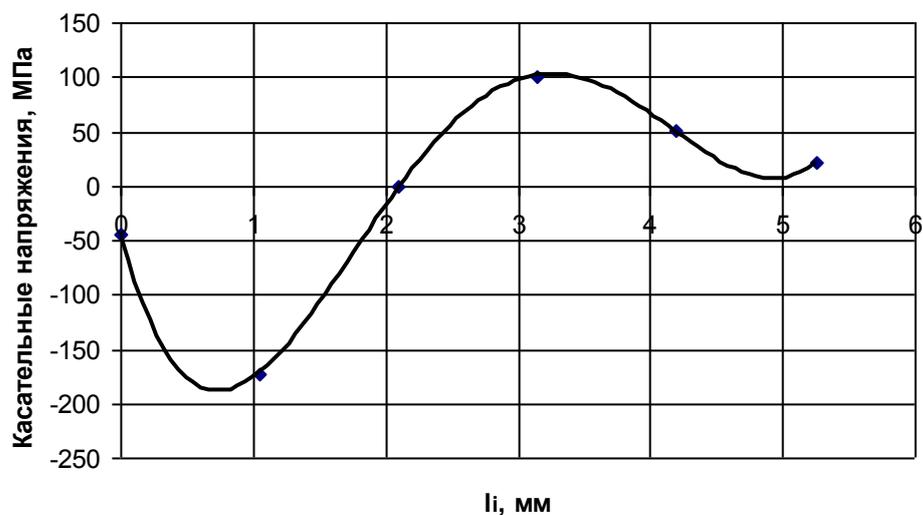


Рис.2.18. Изменения касательных напряжений τ в зоне контакта инструмента с заготовкой на конечном этапе накатки резьбы на путевом шурупе

Кривая изменения касательных напряжений τ по длине пластической зоны l_i аппроксимируется уравнением

$$\tau = f(x) .$$

4. На основании анализа кинематики процесса накатывания резьбы в зависимости от типа применяемого резьбонакатного оборудования определяется скорость проскальзывания ΔV_i инструмента относительно заготовки. Результаты анализа кинематики изложены в промежуточном отчете по этапу № 1 данного исследования, а также в работе [40]. Затем находится относительное проскальзывание ΔS_i поверхности инструмента относительно деформируемой заготовки

$$\Delta S_i = \Delta V_i \cdot t , \quad (2.23)$$

где ΔV_i - скорость проскальзывания инструмента относительно заготовки;

t_i – время контакта инструмента и заготовки на i -ом этапе резьбоформирования, которое определяется как

$$t_i = \frac{l_i}{V} , \quad (2.24)$$

где V – скорость движения инструмента (определяется в зависимости от конструктивного исполнения резьбонакатного станка и его технических характеристик).

5. Определяется работа сил трения на поверхности контакта металла с заготовкой в зоне действия максимальных давлений

$$A_{mp} = \int_0^{l_i} \tau b \Delta S_i dx , \quad (2.25)$$

где b - ширина пластической зоны (ширина выступа инструмента, формирующего впадину резьбы);

ΔS_i - относительное проскальзывание поверхности инструмента относительно деформируемой заготовки.

5. Используя формулу (2.19), определяются объемный износ ΔW наиболее нагруженного участка инструмента, возникающий при накатке одного изделия, и суммарный объемный износ

$$\Delta W_{\Sigma} = \Delta W \cdot k , \quad (2.26)$$

где k – количество накатанных изделий.

Предельно допустимый объемный износ инструмента

$$[\Delta W_{\Sigma}] = \Delta \cdot b \cdot l_i, \quad (2.27)$$

где Δ - половина допуска на внутренний диаметр накатываемой резьбы. При износе выступов накатного инструмента в наиболее нагруженной части более чем на Δ , внутренний диаметр резьбы выходит за пределы допуска.

Приравнивая уравнения (2.26) и (2.27) с учетом (2.19) получено

$$k = \frac{\Delta \cdot b \cdot l_i}{J_{\omega} \cdot A_{mp}}. \quad (2.28)$$

Используя зависимость (2.28), можно рассчитать количество накатанных изделий до момента образования брака по причине несоответствия внутреннего диаметра резьбы требованиям нормативно-технической документации.

2.2.2. Определение показателя энергетической интенсивности изнашивания (ПЭИИ)

Для расчета ресурса резьбонакатного инструмента необходимо иметь информацию о показателе энергетической интенсивности изнашивания J_{ω} . В данной работе (ПЭИИ) определялся на основании экспериментальных исследований, которые проводились на специальной установке, спроектированной и изготовленной на кафедре «Механическое оборудование металлургических заводов» ГОУ ВПО «Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова». Схема установки представлена на рис.2.19.

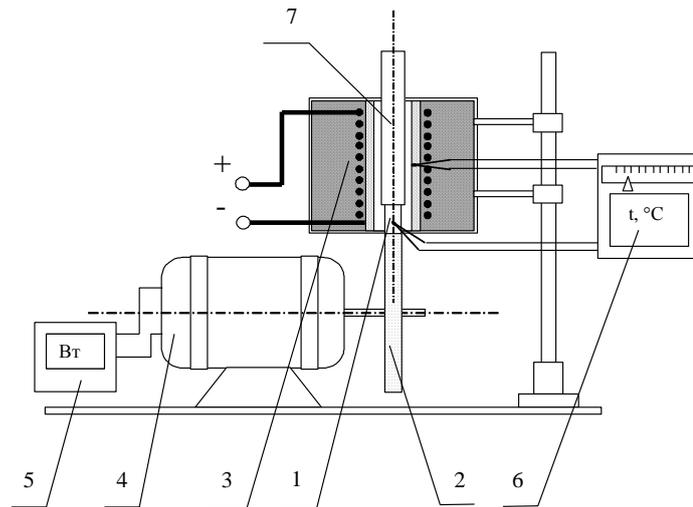


Рис. 2.19. Схема установки для проведения испытаний на изнашивание при высоких температурах.

Установка содержит электродвигатель 4, на валу которого укреплен абразивный диск 2, электрическую печь 3, внутри которой с помощью державки 7 размещается образец 1, который торцевой поверхностью прижимается к абразивному диску 2. Температура нагрева в печи 3 и образца 1 контролируется термопарой, сигнал от которой фиксируется самопишущим прибором 6. Работа сил трения определяется по потребляемой мощности электродвигателя, замеряемой ваттметром 5. Общий вид экспериментальной установки представлен на рис 2.20.

В качестве абразивного диска 2 в установке использовался абразивный круг марки 63С25СМ27КБ3 (из карбида кремния зернистостью до 25мкм, средней мягкости с керамической связкой) диаметром 200мм и шириной 20мм, приводимый во вращение электродвигателем переменного тока мощностью 250 Вт и частотой вращения 1500 об/мин (окружная скорость 16 м/с).

Образцы для испытаний изготавливались в виде цилиндрических стержней диаметром d_0 равным 14 – 15мм и длиной l_0 равной 30мм, на одном из концов которых нарезалась резьба М12 (рис. 2.21). Образцы вкручивались в державку, которая помещается в электрическую печь для нагрева до заданной температуры.



Рис. 2.20. Экспериментальная установка для проведения исследований.



Рис.2.21. Державка и образцы для испытания

Электрическая печь – трубчатого типа с нихромовой спиралью. Питание печи осуществлялось от сварочного трансформатора. При нагреве державка устанавливается таким образом, чтобы образец находился в середине высоты печи, где градиент температуры минимален. Измерение температуры образца производилось хромель-алюмелевой термопарой, закрепленной в

продольном пазу державки. Регистрация температуры осуществляется электронным потенциометром КСП-4.

Нагретый до заданной температуры образец с державкой опускается на вращающийся абразивный круг и истирается в течение 30с. В процессе истирания регистрируется потребляемая электродвигателем мощность с помощью ваттметра типа Д539. Перед каждым испытанием поверхность круга выравнивается алмазной шарошкой.

До и после истирания образцы взвешивали на электронных весах ВЛКТ – 500д – М с точностью до 0,005г. По потере массы образца Δm определяли изношенный объем. Плотность материала принимали равной 7,85 г/см³. Мощность, затрачиваемую на истирание образца, определяли как разность полной мощности и мощности холостого хода двигателя.

Испытаниям подвергались образцы из стали 3Х3М3Ф, которая широко применяется при изготовлении инструмента для горячей обработки давлением. Испытания проводились при комнатной температуре $t=20^{\circ}\text{C}$ и температурах нагрева $t=400^{\circ}\text{C}$ и $t=800^{\circ}\text{C}$. Для каждой температуры использовались по 5 образцов. Усредненные значения результатов экспериментов представлены в табл.2.2.

Таблица 2.2

Результаты экспериментов

	Изношенный объем $\Delta V \cdot 10^{-8}$ м^3	Работа сил трения $A_{\text{тр}}$ Дж	Показатели энергетической интенсивности изнашивания $J_{\omega} \cdot 10^{-11}$ $\text{м}^3/\text{Дж}$
$t=20^{\circ}\text{C}$	5,13	1620	3,17
$t=400^{\circ}\text{C}$	4,49	1260	3,56
$t=800^{\circ}\text{C}$	4,36	990	4,40

2.2.3. Расчет ресурса работы плашек для горячей накатки путевых шурупов

Рассматривался процесс накатки путевого шурупа ЦП-65 (рис. 2.4, 2.5) на резбонакатном станке А2424 (завод «Тяжпрессмаш», г.Рязань). Производительность станка $\Pi = 40$ шт/мин, ход ползуна $H=785$ мм. Станок имеет кривошипно-ползунный механизм привода ползуна. Продолжительность полного цикла накатки одного шурупа (рабочий и холостой ход) составляет

$$T = \frac{1}{\Pi} = \frac{1}{40} = 0,025 \text{ мин} = 1,5 \text{ с}$$

$$\text{Время рабочего хода } t = \frac{T}{2} = 0,75 \text{ с.}$$

$$\text{Средняя скорость движения плашки } V = \frac{H}{t} = \frac{0,785}{0,75} = 1,05 \text{ с}$$

Длина заборной части плашки $L = 150$ мм, диаметр заготовки $d_{заг} = 21,5$ мм, внутренний диаметр резьбы $d = 15$ мм. Тогда количество оборотов заготовки вокруг своей оси, совершаемых на заборной части, определяем по формуле (2.2)

$$n = \frac{2L}{\pi(d_{заг} + d)} = \frac{2 \cdot 180}{3,14 \cdot (21,5 + 15)} = 2,61 .$$

За один полный оборот заготовка деформируется дважды (подвижной и неподвижной плашкой). Тогда количество этапов деформирования $k = 2n = 2 \times 2,61 = 5,22$. Принимает количество этапов деформирования $k = 5$.

Абсолютная радиальная деформация на этапе формирования впадины резьбы в конце заборного участка плашки

$$\Delta h_i = \frac{d_{заг} - d}{k} = \frac{21,5 - 15}{5} = 1,3 \text{ мм}$$

Радиус заготовки на предыдущем этапе

$$R_{i-1} = R_i + \Delta h_i = 7,5 + 1,3 = 8,8 \text{ мм} ,$$

Длина очага пластической зоны

$$l_i = \sqrt{\Delta h_i \cdot (2R_{i-1} - \Delta h_i)} = \sqrt{1,3(2 \cdot 8,8 - 1,3)} = 4,6 \text{ мм} .$$

Время контакта заготовки с инструментом на последнем этапе деформирования в конце заборной части

$$t_1 = \frac{l_i}{V} = \frac{4,6 \cdot 10^{-3}}{1,05} = 0,0048 \text{ с}$$

По результатам исследований, представленным в промежуточном отчете по этапу № 1 данной НИР, а также в работе [40], определялась скорость проскальзывания $\Delta V_i = 0,121$ м/с инструмента относительно заготовки в зоне впадины резьбы. Затем находилось относительное проскальзывание ΔS_i поверхности инструмента относительно деформируемой заготовки

$$\Delta S_i = \Delta V_i \cdot t_1 = 0,121 \cdot 0,0048 = 0,00058 \text{ м}, \quad (0,58 \text{ мм})$$

Используя программный комплекс «DEFORM-3D», в основу которого положен метод конечных элементов, выполнено моделирование процесса накатки резьбы путевого шурупа. Рассматривался процесс формирования кольцевой канавки, профиль которой соответствовал профилю резьбы путевого шурупа (рис.2.5) на цилиндрической заготовке высотой, равной одному шагу резьбы 12,5 мм, плоскими плашками. На рис.2.22,а показаны заготовка с нанесенной сеткой конечных элементов и картина касательных напряжений τ на поверхности контакта заготовки с инструментом (рис.2.22,б) на конечном этапе формирования резьбы (конец заборного участка плашки)

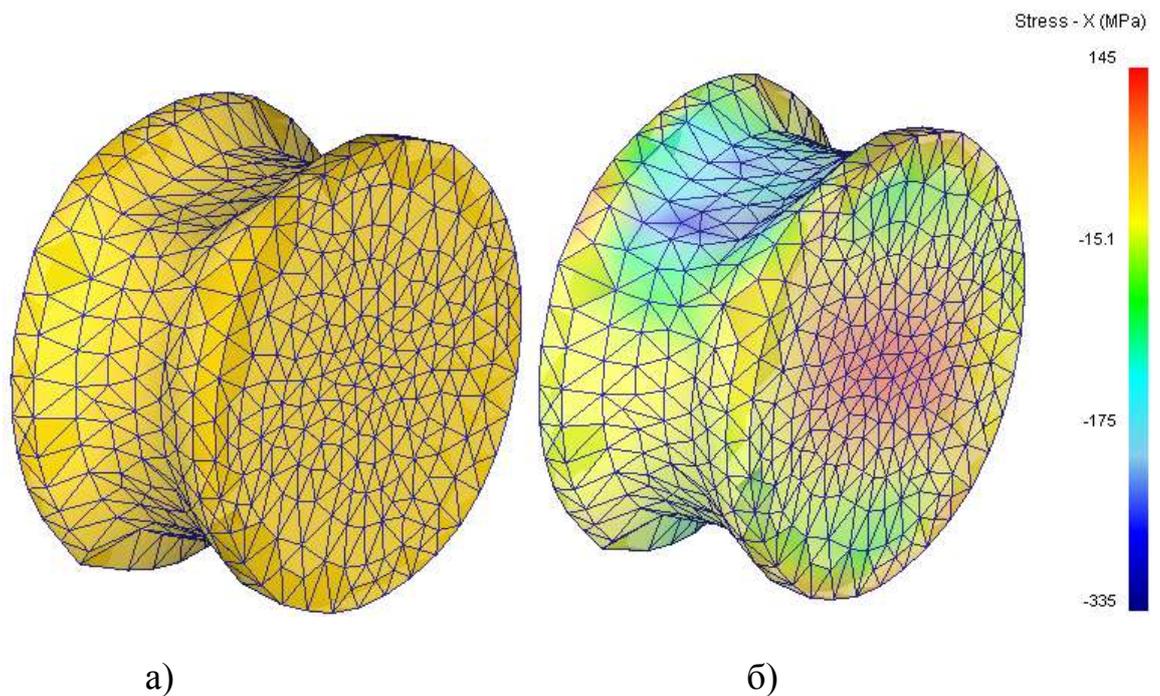


Рис.2.22. Заготовка в конце заборного участка плашки:
а – сетка конечных элементов; б – касательные напряжения на поверхности контакта заготовки с инструментом

На основании выполненных расчетов построена кривая изменения касательных напряжений τ по длине очага пластической деформации (рис.2.3).

Используя программный комплекс «Excel» кривая $\tau = f(x)$ аппроксимировалась уравнением

$$\tau - 9,3195x^4 - 110,88x^3 + 411,76x^2 - 441,76x - 44,91 \quad (2.29)$$

Подставляя (2.29) в уравнение (2.7) и интегрируя последнее, определялась работа сил трения $A_{тр} = \int_0^{l_i} \tau b \Delta S_i dx$, где $b = 6$ мм - ширина пластической зоны (ширина выступа инструмента, формирующего впадину резьбы);

где Δ - половина допуска на внутренний диаметр накатываемой резьбы.

Используя уравнение (2.28), определено количество накатанных изделий ($k = 10646$ шт.) до момента образования брака по причине предельного износа выступов плашек и несоответствия внутреннего диаметра резьбы требованиям нормативно-технической документации.

2.3. Определение рациональных режимов накатывания резьбы на путевых шурупах.

Для формирования наружной резьбы на стержневых изделиях пластическим деформированием наиболее широкое используется инструмент в виде двух резьбонакатных плашек, каждая из которых имеет опорные боковые и торцевые грани и рабочую поверхность, состоящую из заборного и калибрующего участков с чередующимися впадинами и выступами, которые наклонены к опорным боковым граням под углом, близким к углу подъема винтовой линии накатанной резьбы [42].

Недостатком инструмента известной конструкции является его сравнительно низкая износостойкость. Это обусловлено тем, что при накатке резьбы угол наклона винтовой линии по впадинам формируемой резьбы является величиной переменной. Изменение указанного угла в процессе накатки приводит к локальному проскальзыванию инструмента относительно деформируемой заготовки и, как следствие, - интенсивному износу плашек. При этом в известном инструменте каждый участок впадины резьбы формируется подвижной и неподвижной плашками за несколько этапов деформирования, на каждом из которых приходится выправлять профиль резьбы, сформированный на предыдущем этапе, что также приводит к интенсивному износу плашек, излишним затратам энергии, а в некоторых случаях - к образованию задиров и отслоений на поверхности резьбы изделий, что значительно снижает качество последних. Это особенно характерно для процессов накатки крупной резьбы, например, резьбы на путевых шурупах.

Разработана новая конструкция резьбонакатных плашек, применение которой позволяет снизить проскальзывание заготовки относительно инструмента и повысить качества резьбы при снижении энергозатрат на процесс резьбоформирования. На рис.2.24 *а* представлен фронтальный вид одной из плашек для накатки крупной резьбы; на рис.2.24 *б* изображен вид сверху на рабочую поверхность плашки; на рис.2.24 *в* - сечение А-А.

Инструмент для накатки крупной резьбы (рис.2.24) содержит две плашки 1, каждая из которых имеет опорные боковые 2 и торцевые 3 грани, а также рабочую поверхность 4. Рабочая поверхность 4 состоит из заборной 5 и калибрующей 6 частей с чередующимися впадинами 7 и выступами 8, которые в продольном направлении наклонены к опорным боковым граням 2 плашек. При этом на заборной части 5 плашек 1 угол наклона α впадин 7 и выступов 8 к опорной боковой грани 2 выполнен переменным. Причем на начальном участке заборной части 5 указанный угол α составляет $(0,88...0,92)\beta$, где β - угол наклона впадин 7 и выступов 8 к опорной боковой грани 2 калибрующей части 6, а на конечном участке заборной части 5 углы α и β одинаковы.

Выполнять указанный угол наклона α меньше, чем $0,88\beta$, где β - угол наклона впадин и выступов к опорной боковой грани калибрующей части, нецелесообразно, так как это приводит к повышенному износу боковых поверхностей выступов на начальном участке заборной части плашек.

Выполнять угол α более чем $0,92\beta$ также нецелесообразно, так как в этом случае происходит интенсивный износ верхней части выступов плашек.

Инструмент работает следующим образом. Одна плашка укрепляется на станину накатного станка, а другая плашка - на ползун станка, причем плашки обращены друг к другу рабочими поверхностями 4 и между ними образован зазор, близкий к внутреннему диаметру резьбы изделия. Затем исходная заготовка подается в зазор между рабочими поверхностями 4 плашек 1 и при движении подвижной плашки осуществляется процесс накатывания резьбы. При этом на начальном участке заборной части 5 в заготовку внедряются выступы 8 плашек 1 с углом наклона α к опорной боковой грани 2, равный $(0,88...0,92)\beta$, где β - угла наклона впадин и выступов к боковой опорной грани 2 на калибрующей части 6. На конечном участке заборной части 5 угол α становится равным углу β и соответствует углу подъема

винтовой линии по впадинам сформированной резьбы. В результате этого в процессе резьбоформирования, по мере перемещения заготовки по заборной части 5 угол подъема винтовой линии по впадинам формируемой резьбы остается практически неизменным, что способствует снижению проскальзывания рабочей поверхности инструмента относительно деформируемой заготовки.

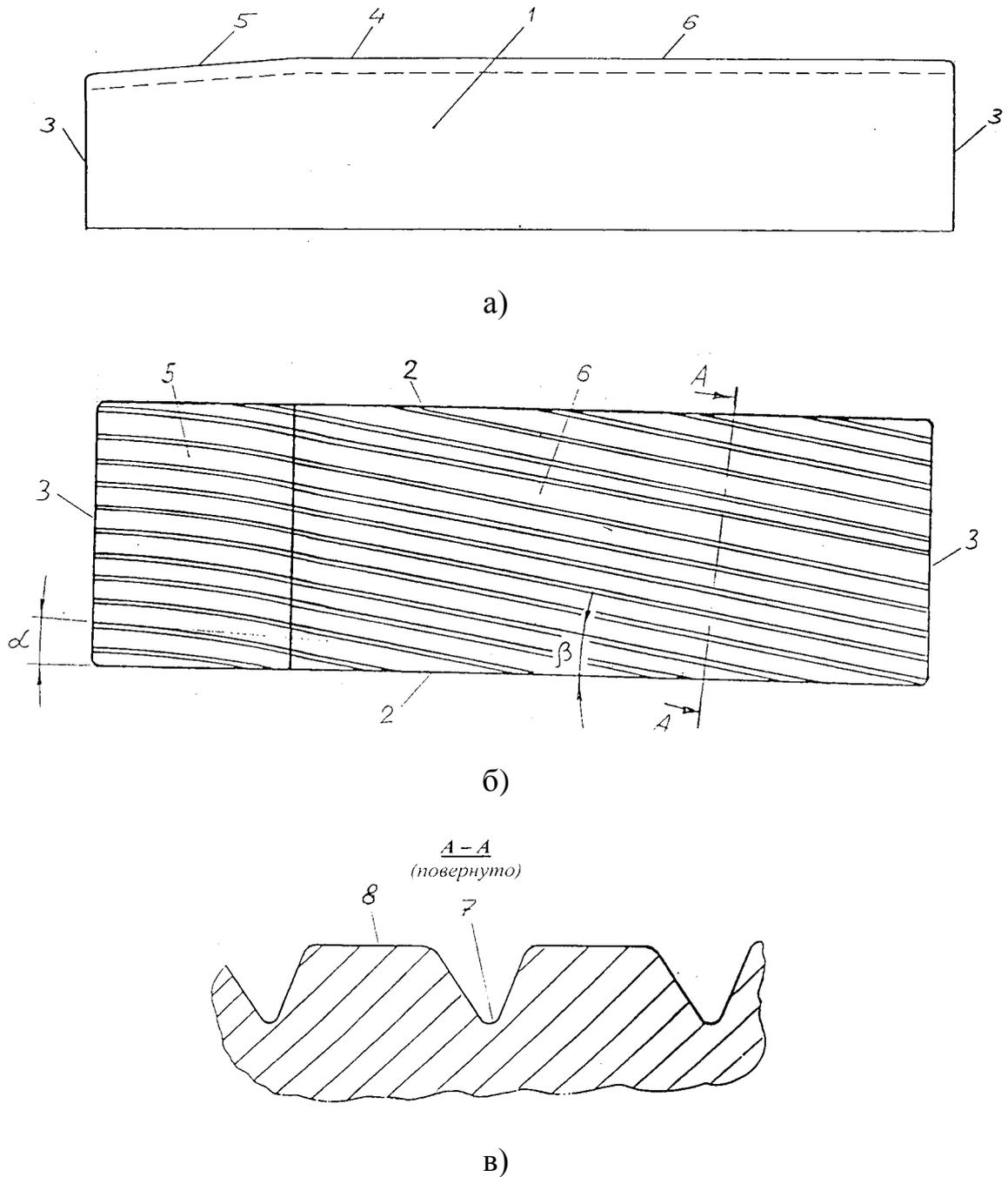


Рис. 2.24. Плашка с переменным углом наклона выступов и впадин на заборной части

Снижение эффекта проскальзывания заготовки относительно рабочей поверхности инструмента, в свою очередь, обеспечивает снижение энергозатрат на процесс резьбоформирования, повышает срок службы плашек и качество резьбы за счет исключения образования задиров и отслоений на поверхности резьбы.

Разработанный инструмент использовался при изготовлении путевых шурупов по ГОСТ 809-71 с наружным диаметром резьбы – 24 мм, внутренним диаметром – 15 мм и шагом – 12,5 мм . Шурупы изготавливались на многопозиционном автомате-комбайне КА-84 (фирма «Malmedi», Германия) холодной штамповкой за четыре перехода с последующей накаткой резьбы плоскими плашками. Отштампованная заготовка в виде ступенчатого стержня с головкой подавалась в зазор между неподвижной и подвижной плашками резьбонакатного устройства автомата и при движении подвижной плашки осуществлялся процесс накатывания резьбы. При этом использовались плашки, у которых на начальном участке заборной части угол наклона выступов и впадин к опорной боковой грани составлял $10^{\circ}30'$. На конечном участке заборной части угол $\beta = 11^{\circ}50'$, что соответствует углу подъема винтовой линии по среднему диаметру сформированной резьбы. Рабочая поверхность подвижной и неподвижной плашек формировалась фрезерованием на станке с числовым программным управлением. Процесс накатки резьбы на путевых шурупах протекал стабильно, качество изделий соответствовало требованиям нормативно-технической документации.

Сравнительный анализ износостойкости инструмента показал, что срок службы разработанной конструкции инструмента выше на 12...15 % по сравнению с прототипом, у которого угол наклона чередующихся впадин и выступов к боковым опорным граням по всей длине заборного и калибрующего участка одинаковый и составлял $11^{\circ}50'$.

Вышеизложенные материалы раздела 2.3. положены в основу направленной в ФИПС заявки на полезную модель «Инструмент для накатки крупной резьбы».

Заключение

1. Разработана методика прогнозирования точности накатанной резьбы. В основу методики положен метод определения случайных погрешностей, возникающих в результате колебаний радиальной составляющей усилия накатывания, которые возникают по причине колебаний предела текучести σ_0 материала заготовки, температуры нагрева T , диаметра d_0 и длины L исходной заготовки, коэффициента трения μ .

2. Используя программный комплекс «DEFORM-3D», в основу которого положен метод конечных элементов, выполнено моделирование процесса накатки резьбы путевого шурупа и определено напряженно-деформированное состояние и энергосиловые параметры. Используя результаты компьютерного моделирования, определялись случайные погрешности диаметра накатываемой резьбы Δd_σ , Δd_T , Δd_μ , Δd_{d_0} , Δd_L , возникающие при колебании технологических параметров $(\sigma_0, T, \mu, d_0, L)$, и вычислялась общая случайная погрешность, по которой оценивалась точность накатываемой резьбы. На основании выполненных расчетов установлено:

- колебания внутреннего диаметра резьбы путевых шурупов наиболее чувствительны к колебаниям температуры T нагрева и базисного сопротивления деформации σ_0 , а влияние колебания коэффициента трения μ и диаметра d_0 исходной заготовки незначительно;

- при накатке резьбы путевого шурупа ЦП-65 (ТУ 14-176-133-2004) из стали марки 20 плоскими плашками на резьбонакатном станке А2424 (коэффициент жесткости $C = 500$ кН/мм) суммарная погрешность внутреннего

диаметра накатанной резьбы не выходит за пределы регламентированного допуска: [-500 мкм, +500 мкм].

3. Используя установку, разработанную на кафедре «Механическое оборудование металлургических заводов» ГОУ ВПО «МГТУ им. Г.И. Носова», проведены экспериментальные исследования, на основании которых определен показатель энергетической интенсивности изнашивания J_{ω} для стали 3ХЗМЗФ при комнатной температуре ($t=20^{\circ}\text{C}$) и температурах нагрева $t=400^{\circ}\text{C}$ и $t=800^{\circ}\text{C}$.

4. Разработана методика прогнозирования износостойкости резьбонакатного инструмента. Методика базируется на основных положениях энергетической теории изнашивания твердых тел Крагельского-Гаркунова, согласно которой объемный износ ΔW пропорционален работе сил трения A_{mp} в зоне контакта и показателю энергетической интенсивности изнашивания J_{ω} .

По результатам компьютерного моделирования процесса накатки резьбы путевого шурупа с использованием программного комплекса «DEFORM-3D» установлен характер изменения касательных напряжений τ по длине пластической зоны и определена работа сил трения A_{mp} на поверхности контакта металла с заготовкой в зоне действия максимальных давлений. Конкретные расчеты выполнены для оценки ресурса резьбонакатных плашек для накатки резьбы путевого шурупа ЦП-65 (ТУ 14-176-133-2004) из стали марки 20. Расчитано ожидаемо количество накатанных изделий до момента образования брака по причине несоответствия внутреннего диаметра резьбы требованиям нормативно-технической документации.

5. На основании проведенных исследований разработана новая конструкция резьбонакатных плашек для накатки путевых шурупов. Предложено на заборной части угол наклона впадин и выступов к опорным боковым граням выполнять переменным, причем на начальном участке заборной части указанный угол наклона должен составляет 0,88...0,92 угла наклона впадин и выступов калибрующей части, а на конечном участке - равен углу наклона

впадин и выступов калибрующей части. Подана заявка на полезную модель «Инструмент для накатки крупной резьбы».

6. По материалам ранее проведенных исследований, представленных в отчете по этапу № 1, опубликована статья в рецензируемом высокорейтинговом издании [43].

Список использованных источников

1. *Гжиров Р.И.* Краткий справочник конструктора. – Л.: Машиностроение, 1983. – С. 464 .
2. *Никифоров А.Д.* Точность и технология изготовления метрических резьб. - М.: Высшая школа, 1963. - 180 с
3. *ГОСТ 16093-81.* Основные нормы взаимозаменяемости. Резьба метрическая. Допуски. Посадки с зазором.
4. *ГОСТ 9150-81.* Основные нормы взаимозаменяемости. Резьба метрическая. Профиль.
5. *ГОСТ 8724-81.* Основные нормы взаимозаменяемости. Резьба метрическая. Диаметры и шаги.
6. *ГОСТ 24705-81.* Основные нормы взаимозаменяемости. Резьба метрическая. Основные размеры.
7. *Миропольский Ю.А., Луговой Э.П.* Накатывание резьб и профилей. - М.: Машиностроение, 1976. - 175 с.
8. *Ямамото А., Акаси К, Есимото И.* Усилие накатывания и расчет межцентрового расстояния накатных роликов // Перевод ВИНТИ № 52847/5. Статья из журнала «Никой кикай гаккай ромбунсю». – 1960. - № 166. - С. 813 – 826.

9. *Jamamoto A., Joshimoto I.* Investigations on thread rolling // Bulletin of the Tokyo Institute of Technology. – 1961. - N 40. - P. 141-145.

10. *Dallas D. B.* Getting the most of thread rolling attachments // The Tool and Manufacturing engineer. – 1966. - Apr. - P. 170-173.

11. *Ланской Е.Н., Назаренко Е.С., Лобанова В.Н.* Нормирование жесткости однокривошипных открытых прессов простого действия // Кузнечно-прессовые машины. Расчет, исследование, испытания: Сб. науч. тр. ЭНИК-МАШа /Под ред. Н.Т.Деордиева. М.: Машиностроение, 1969. - С. 3-9.

12. *Серавин Ф.А., Ланской Е.Н., Кравец В.С.* Нормирование жесткости винтовых фрикционных прессов // Кузнечно-прессовые машины. Расчет, исследование, испытания: Сб. науч. тр. ЭНИКМАШа/ Под ред. Н.Т.Деордиева. М.: Машиностроение, 1969. - С. 3-9.

13. *Ланской Е.Н., Миропольский Ю.А., Гусинский В.И.* Технологические факторы, влияющие на точность изделий, получаемых на одно-и двухударных холодновысадочных автоматах // Новые технологии обработки металлов давлением.- М.: Машиностроение, 1967. С. 163-179.

14. *Ланской Е.Н.* Характеристика точностных параметров кузнечно-прессового оборудования // Вестник машиностроения, 1965, № 12. С. 51-56.

15. *Бродский Е.Д., Ланской Е.Н., Разоренов С.В.* Точность штамповки и жесткость многопозиционных автоматов для холодной штамповки // Кузнечно-штамповочное производство, 1966, № 12. С. 24-28.

16. *Ланской Е.Н.* Общий метод анализа жесткости прессов для объемной штамповки // Кузнечно-штамповочное производство, 1969, № 5, С. 20-25.

17. *Ланской Е.Н., Силанов В.И.* Жесткость холодновысадочных автоматов // Вестник машиностроения, 1960, № 3. С. 56-59.

18. *Ланской Е.Н., Нузов А.Я.* О точности наладки прессов-автоматов // Кузнечно-штамповочное производство, 1964, № 1. С. 29-32.

19. *Паршин В.Г., Железков О.С.* Определение точности головок болтов и стабильности процессов при холодной высадке на однопозиционных автоматах // Теория и практика производства метизов. Свердловск 1977. С. 18-21.

20. *Паршин В.Г., Железков О.С.* Расчет точности высоты головки при холодной высадке болтов // Теория и практика производства метизов. Свердловск, 1978. С. 137-140.

21. *Железков О.С.* Исследование энергосиловых параметров процесса высадки прокаткой головок стержневых изделий// Кузнечно-штамповочное производство, 1994, № 6. С. 33-36.

22. *Писаревский М.И.* Накатывание точных резьб, шлицев и зубьев. - Л.: Машиностроение, 1973. – С. 200.

23. *Журавлев А.З., Луговой Э.П.* Контроль и прогнозирование точности резьбы, накатанной на автоматах // Кузнечно-штамповочное производство. – 1990. - № 8. – С. 23-25.

24. *Журавлев А.З., Луговой Э.П., Илясов В.В.* Определение усилий накатывания резьбы на автоматах с роликами и сегментами с учетом жесткости системы // Кузнечно-штамповочное производство. – 1992. - № 4. - С.7-9.

25. *Крагельский И.В.* Трение и износ. – М.: Машиностроение, 1968. 480 с.

26. *Виноградов В.Н., Сорокин Г.М.* Механическое изнашивание сталей и сплавов. – М.: Недра, 1996. – 364 с.

27. *Хрущов М.М., Бабичев М.А.* Абразивное изнашивание. – М.: Наука, 1970. – 251 с.

28. *Ямпольский Г.Я., Калугин Ю.К., Южаков И.В.* Косвенная оценка абразивной износостойкости деталей по характеристикам, определяемым внедрением и царапанием инденторами // Износ в машинах и методы защиты от него. – М.: Машиностроение, 1985. – С. 59 – 60.

29. *Кащеев В.Н., Гладков В.М.* Абразивная износостойкость и силы связи решетки металлов // Изв. вузов. Физика. – 1981. – №12. – С. 156 – 159.

30. *Львов П.Н.* Основы абразивной износостойкости деталей строительных машин. – М.: Стройиздат, 1970. – 72 с.
31. *Погодаев Л.И., Шевченко П.А.* Гидроабразивный и кавитационный износ судового оборудования. – Л.: Судостроение, 1984. – 263 с.
32. Аналитические и инженерные критерии оценки абразивной износостойкости белых легированных чугунов / В.М.Колокольцев, Е.В.Синицкий, П.А.Молочков и др. // Вестник МГТУ. – 2004. №1(5). – С. 37 – 40.
33. Абразивная износостойкость литых металлов и сплавов / В.М.Колокольцев, Н.М.Мулявко, К.Н.Вдовин и др.. – Магнитогорск: МГТУ, 2004. – 228 с.
34. *Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С.* Основы расчетов на трение и износ. – М.: Машиностроение, 1977. – 526 с.
35. *Гаркунов Д.Н.* Триботехника (износ и безизносность)- М.:» Изд-во МСХА», 2001. С. 616.
36. *Гаркунов Д.Н.* Триботехника. - М.: Машиностроение, 1985. С.327.
37. *Анцупов В.П., Бояришинов М.И., Заверюха В.Н.* Прогнозирование износа рабочих валков при горячей прокатке // Сталь, 1978. №6. С.531 – 535.
38. Модель изнашивания валков при бескалибровой прокатке сортовых заготовок / Л.Е.Кандауров, А.К.Белан, Н.Ш.Тютеряков и др. // Обработка сплошных и слоистых материалов: Межвуз. сб. науч. тр. – Магнитогорск, 2002. – С. 66 – 70.
39. Модель изнашивания линеек валковой арматуры для бескалибровой прокатки заготовок / Б.А.Никифоров, Л.Е.Кандауров, А.К.Белан и др. // Тр. 5-го конгресса прокатчиков (21 – 24 октября 2003, Череповец) – М: ОАО Черметинформация. 2004. – С. 485 – 487.
40. *Железков С.О., Железков О.С., Моллер А.Б.* Анализ кинематики процесса накатки наружной резьбы / Моделирование и развитие процессов обработки металлов давлением: Межрегион. сб. науч. тр.- Магнитогорск: ГОУ ВПО «МГТУ». 2009. С. 218-223.

41. *ГОСТ 27674-88*. Трение, изнашивание и смазка. Термины и определения.- М.: Изд-во стандартов, 1988. С.89.

42. *М.И.Писаревский*. Накатывание точных резьб, шлицев и зубьев. – Л.: Машиностроение, 1973. С. 200.

43. *Железков О.С., Железков С.О., Семашко В.В.* Особенности горячей накатки резьбы на путевых шурупах тремя роликами / Кузнечно-штамповочное производство. Обработка металлов давлением. 2011. № 3. С. 31-33.