

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

На правах рукописи



Мирзоян Наталия Юрьевна

УДК 621.923

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ МЕЛКОРАЗМЕРНОГО
РЕЗЬБООБРАЗОВАНИЯ В ГЛУХИХ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЯХ
ПУТЁМ ОПТИМИЗАЦИИ ЦИКЛА ОБРАБОТКИ**

Специальность 2.5.6. Технология машиностроения

Диссертация на соискание учёной степени

кандидата технических наук

Научный руководитель:

кандидат технических наук, профессор

Харченко Александр Олегович

Севастополь – 2026

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
ГЛАВА 1 АНАЛИЗ ПРИЧИН СНИЖЕНИЯ ТОЧНОСТИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ВНУТРЕННИХ РЕЗЬБ МАЛЫХ ДИАМЕТРОВ В ДЕТАЛЯХ С ГЛУХИМИ ГЛУБОКИМИ ОТВЕРСТИЯМИ.....	10
1.1 Обзор и анализ особенностей формообразования внутренних резьб М2...М6 в глухих глубоких отверстиях	10
1.2 Анализ прогрессивных конструкций метчиков для внутренней резьбообработки	21
1.3 Анализ существующих исследований процессов мелкоразмерной резьбообработки	29
1.4 Анализ существующих методов мелкоразмерной резьбообработки в глухих глубоких отверстиях	38
1.5 Анализ методов оценки надежности технологической системы станочного оборудования и резбонарезного инструмента.....	49
1.6 Выводы. Основные задачи исследования.....	58
ГЛАВА 2 АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕЛКОРАЗМЕРНОГО РЕЗЬБООБРАЗОВАНИЯ МЕТЧИКАМИ В ГЛУХИХ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЯХ .	62
2.1 Теоретические предпосылки, гипотезы и принятые допущения	62
2.2 Анализ структуры процесса мелкоразмерной резьбообработки в глухих глубоких отверстиях	65
2.3 Обоснование на основе морфологического анализа структуры технологической системы мелкоразмерной резьбообработки в глухих глубоких отверстиях	70
2.4 Анализ надежности и переналаживаемости технологической системы при получении МРвГГО	82
2.5 Надежность инструмента при МРвГГО.....	88
2.6 Надежность приспособления при МРвГГО.....	97
2.7 Выводы по разделу.....	106
ГЛАВА 3 ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ВНУТРЕННИХ РЕЗЬБ В ГЛУХИХ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЯХ .	108
3.1 Задачи экспериментальных исследований. Общая методика проведения экспериментов	108
3.2 Требования к инструментам для формообразования мелкоразмерных резьб в глухих глубоких отверстиях	114

3.3 Требования к способу формообразования рабочей поверхности мелкоразмерных резьб в глухих глубоких отверстиях (МРвГГО)	119
3.4 Результаты экспериментальных исследований эффективности получения мелкоразмерных резьб в глухих глубоких отверстиях (МРвГГО)	127
3.4.1 Исследование эксплуатационной надежности метчиков с учетом параметров потоков отказов функционирования	127
3.4.2 Исследование точностных характеристик внутренних резьб и технологической надежности метчиков с учетом потоков параметрических отказов	135
3.4.3 Исследование величин крутящих моментов при формообразовании МРвГГО	148
3.5 Основные результаты экспериментальных исследований по динамике изменения крутящих моментов и проверке адекватности теоретической модели нового способа МРвГГО как составляющей технологической системы	159
3.6 Выводы по разделу	166
ГЛАВА 4 ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ОПТИМИЗА- ЦИИ ПРОЦЕССА МЕЛКОРАЗМЕРНОГО РЕЗЬБООБРАЗОВАНИЯ МЕТЧИ- КАМИ В ГЛУХИХ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЯХ	171
4.1 Исследование надежности технологической системы МРвГГО с учетом параметров потоков отказов и восстановлений (машинный эксперимент) ..	171
4.2 Экспериментальная проверка методики оптимизации процесса МРвГГО путем новой управляющей программы ЧПУ станком мод. МАХХmill 630.	177
4.3 Перспективы внедрения результатов диссертационной работы в производство	184
4.4 Выводы по разделу	185
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	187
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ	190
ПРИЛОЖЕНИЕ А	204
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	208
ПРИЛОЖЕНИЕ В	220
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	225

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Разнообразие профилей резьбы в деталях, различные требования к точности и шероховатости обработки, а также характер производств и оборудования определяют большое количество способов резьбообразования.

Существенные сложности возникают при обработке внутренних резьб малых диаметров (М2...М6) в глухих глубоких отверстиях, где длина резьбы превышает три их диаметра. В таких случаях наблюдается низкая производительность, обусловленная необходимостью использования набора метчиков (чернового, среднего и чистового), а также недостаточное качество резьбы из-за перекоса метчиков и проблем с удалением стружки.

Эти трудности связаны с малыми габаритами обрабатываемых изделий, низкой стойкостью режущего инструмента, несовершенством конструкции и неблагоприятными условиями работы режущих элементов метчика в зоне резания (интенсивное наростообразование, ограниченный доступ СОТС, накопление стружки и невозможность ее эффективного удаления из зоны контакта). Формирование внутренних резьб малых диаметров в глухих глубоких отверстиях является одним из наиболее сложных процессов металлообработки. Конструктивные особенности метчиков ограничивают возможности оптимизации геометрии рабочей части, прочность которой зачастую оказывается недостаточной, а подача СОТС и удаление стружки из зоны обработки затруднены. Обработка происходит практически «всухую», что снижает стойкость инструмента и ограничивает скорость резьбообразования.

При автоматизации этого процесса с использованием станков с ЧПУ часто из-за отсутствия при их программировании стандартных рациональных циклов происходит заклинивание и поломка метчика в глухом глубоком отверстии по причине пакетирования стружки между зубьями и поверхностью образуемой резьбы. Это требует глубокого анализа и экспериментальной

проверки для повышения эффективности процесса мелкоразмерного резбообразования в глухих глубоких отверстиях путём оптимизации цикла обработки, чем и обуславливается актуальность данной темы исследования.

Степень разработанности темы исследования. Исследованию закономерностей процесса формирования внутренних резбовых поверхностей посвящены работы известных исследователей: В.В. Матвеева, В.И. Шагуна, А.А. Грудова, Ю.Л. Фрумина, О.С. Андрейчикова, А.Е. Стешкова, В.М. Меньшакова, Г.П. Урлапова, Родина П.Р., В.С. Середы, А.Н. Резникова, А.И. Боярунаса, В.Г. Якухина, А.С. Ямникова, Ф.Н. Канареева, А.О. Харченко, С.М. Братана, П.А. Новикова и многих других. Результаты их работы внесли значительный вклад в развитие теории и практики формирования внутренних резб, фундаментальных положений для обеспечения их точности и качества. Однако, несмотря на существенную теоретическую и практическую базу, до сих пор не решены задачи высокоэффективной резбообработки мелкоразмерных глухих глубоких отверстий.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности процесса мелкоразмерного резбообразования в глухих глубоких отверстиях путём оптимизации цикла обработки.

Основные задачи исследования:

1. Исследовать причины снижения эффективности и точности формообразования внутренних резб малых диаметров в деталях с глухими глубокими отверстиями.
2. Разработать общую модель формирования технологической системы резбообработки, алгоритм обеспечения точности и структурную схему процесса мелкоразмерного резбообразования в глухих глубоких отверстиях.
3. Разработать математические модели для оценки надёжности технологической системы мелкоразмерного резбообразования в глухих глубоких отверстиях с учетом потоков отказов и восстановлений.

4. Усовершенствовать на основе морфологического анализа и структурно-компоновочного синтеза процесс формообразования рабочей поверхности мелкогазмерных резб в глухих глубоких отверстиях.

5. Экспериментально подтвердить эффективность усовершенствованного процесса формообразования мелкогазмерных резб в глухих глубоких отверстиях.

6. Осуществить проверку нового технического решения, оценить надёжность инструмента при использовании нового способа обработки и оценить перспективы использования для внедрения результатов в производство.

Научная новизна:

1. Установлены взаимосвязи между входными и выходными параметрами процесса мелкогазмерного резбообразования в глухих глубоких отверстиях, что позволяет прогнозировать поведение технологической системы при изменении структуры цикла обработки.

2. Разработаны марковская, полумарковская и имитационная модели для оценки надёжности технологической системы (станка, инструмента и приспособления) мелкогазмерного резбообразования в глухих глубоких отверстиях с учетом потоков отказов, переналадки и восстановлений технологических элементов.

3. Дана количественная оценка показателей эффективности – стойкости инструмента, точности и качества обработанной резбовой поверхности в глухих глубоких отверстиях при разных способах подачи, разными инструментами и в различных материалах; с использованием методов морфологического анализа и синтеза созданы эффективные структурные варианты инструмента и цикла резбообработки для использования в автоматизированном производстве на многооперационных станках с ЧПУ.

Теоретическая и практическая значимость работы заключается в:

– разработке математических моделей для оценки надёжности технологической системы мелкогазмерного резбообразования в глухих

глубоких отверстиях с учетом потоков отказов, переналадок и восстановлений при изменениях структуры циклов обработки;

- разработанной на основе моделирования методике получения с помощью экспериментального стенда и многооперационного станка при мелкогабаритном резбообразовании параметров стойкости, точности и качества в глухих глубоких отверстиях, соответствующим прогнозируемым, для структурных вариантов технологических элементов, выбранных в результате морфологического анализа и структурно-компоновочного синтеза;

- обоснованном выборе структуры цикла обработки (патент RU № ...) на основе нового способа получения резьбы, повышающего стойкость метчика, а также точность и качество обработанной резьбовой поверхности в глухих глубоких отверстиях.

Объектом исследования является процесс мелкогабаритного внутреннего резбообразования в глухих глубоких отверстиях.

Предметом исследования являются закономерности формирования показателей эффективности – стойкости инструмента, точности и качества обработанной резьбовой поверхности в глухих глубоких отверстиях при изменении структуры цикла обработки.

Методология и методы исследования. Методологической основой исследования служат основные положения теории технических систем, теории резания металлов, технологии машиностроения, теории случайных процессов, теория вероятностей, марковское, полумарковское и имитационное моделирование. При построении математических моделей также используются преобразования Лапласа, обобщенный закон Эрланга второго порядка, интегральные исчисления и дифференциальные уравнения. Экспериментальные исследования выполнялись с помощью специально разработанной установки с учетом особенностей процесса резбообразования и с применением средств программирования.

Личный вклад автора. Все результаты получены автором лично или при непосредственном его участии. В статьях, опубликованных в соавторстве,

личный вклад автора состоит в следующем: разработаны марковские, полумарковские и имитационные математические модели для оценки надежности, а также общая модель формирования рациональной технологической системы, алгоритм обеспечения точности и структурная схема процесса мелкогабаритного резбобразования в глухих глубоких отверстиях.

Положения, выносимые на защиту:

1. Закономерности влияния параметров процесса мелкогабаритного резбобразования в глухих глубоких отверстиях и цикла обработки на надёжность технологической системы с учетом потоков отказов, переналадки и восстановлений технологических элементов.

2. Комплекс технических решений повышения эффективности – стойкости инструмента, точности и качества обработанной резбовой поверхности в глухих глубоких отверстиях на основе оптимизации цикла обработки.

3. Результаты экспериментальных исследований повышения эффективности усовершенствованного процесса формообразования мелкогабаритных резб в глухих глубоких отверстиях на основе оптимизации цикла обработки.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности.

Диссертационная работа представляет собой новое решение актуальной научно-технической задачи – повышения эффективности процесса мелкогабаритного резбобразования в глухих глубоких отверстиях путём оптимизации цикла обработки на основе моделирования и оценки надёжности технологической системы с учетом потоков отказов, переналадки и восстановлений технологических элементов. Данная работа соответствует паспорту научной специальности 2.5.6 Технология машиностроения. Области исследования: №3 (математическое моделирование технологических процессов и методов изготовления деталей и сборки изделий машиностроения), №4 (совершенствование существующих и разработка

новых методов обработки и сборки с целью повышения качества изделий машиностроения и снижения себестоимости их выпуска), №5 (методы проектирования и оптимизации технологических процессов), №7 (технологическое обеспечение и повышение качества поверхностного слоя, точности и долговечности деталей машин).

Степень достоверности и апробация результатов. Достоверность полученных результатов обеспечивается корректностью постановки задач при построении математических моделей и обоснованностью принятых допущений. Адекватность полученных результатов подтверждена корректным использованием современных методов теоретических и экспериментальных исследований, а также результатами внедрения в производство. Результаты работы докладывались на Всероссийских и Международных научно-технических конференциях: IX Всероссийская научно-практическая конференция «Автомобилестроение: проектирование, конструирование, расчет и технологии ремонта и производства» (г. Ижевск, 25-26 апреля 2025 г.); XVII Международная научно-техническая конференция «Наукоёмкие технологии в машиностроении: современные тренды, перспективы развития и опыт подготовки инженерных кадров» (г. Алушта, 8-13 сентября 2025 г.).

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликовано 9 научных статей, в том числе 6 из них в изданиях, включенных в перечень ВАК РФ.

Структура и объём работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырёх глав, основных результатов и общих выводов, списка литературы (132 наименования) и четырёх приложений. Работа изложена на 226 странице машинописного текста, включает 67 рисунков и 32 таблицы.

ГЛАВА 1

АНАЛИЗ ПРИЧИН СНИЖЕНИЯ ТОЧНОСТИ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ВНУТРЕННИХ РЕЗЬБ МАЛЫХ ДИАМЕТРОВ В ДЕТАЛЯХ С ГЛУХИМИ ГЛУБОКИМИ ОТВЕРСТИЯМИ

1.1 Обзор и анализ особенностей формообразования внутренних резьб М2...М6 в глухих глубоких отверстиях

Разнообразие профилей резьбы в деталях, различные требования к точности и шероховатости обработки, а также характер производств и оборудования определяют большое количество способов резьбообразования [17, 71, 115].

Основное деление в технологии изготовления резьб производится по расположению резьбовой поверхности в детали: резьбы внутренние и наружные. Число деталей с наружной резьбой превышает число деталей с внутренней резьбой, однако объясняется это в основном тем, что для многих деталей с внутренними резьбами, например, для корпуса с большим числом резьбовых отверстий, требуется при сборке значительное число деталей с наружной резьбой. Внутренняя резьба имеется практически в деталях всех типов. Главным образом она сосредоточена в крепёжных деталях, однако значительная доля резьб приходится также на детали типа корпусов и полых цилиндров. Эти детали являются более сложными, более трудоемкими и дорогими в обработке, так как часто требуют при изготовлении использования сложного и дорогостоящего оборудования [132]. По диаметру: резьбы малых диаметров – до 6 мм, средних диаметров – 6...60 мм, больших диаметров – 60...600 мм. Резьбовые соединения получили широкое распространение, их доля составляет 60...80% от общего числа сопряжений в машино- и приборостроении. Размеры внутренней резьбы в процентном соотношении с распространённостью их применения можно представить в виде диаграммы (рисунок 1.1.1).

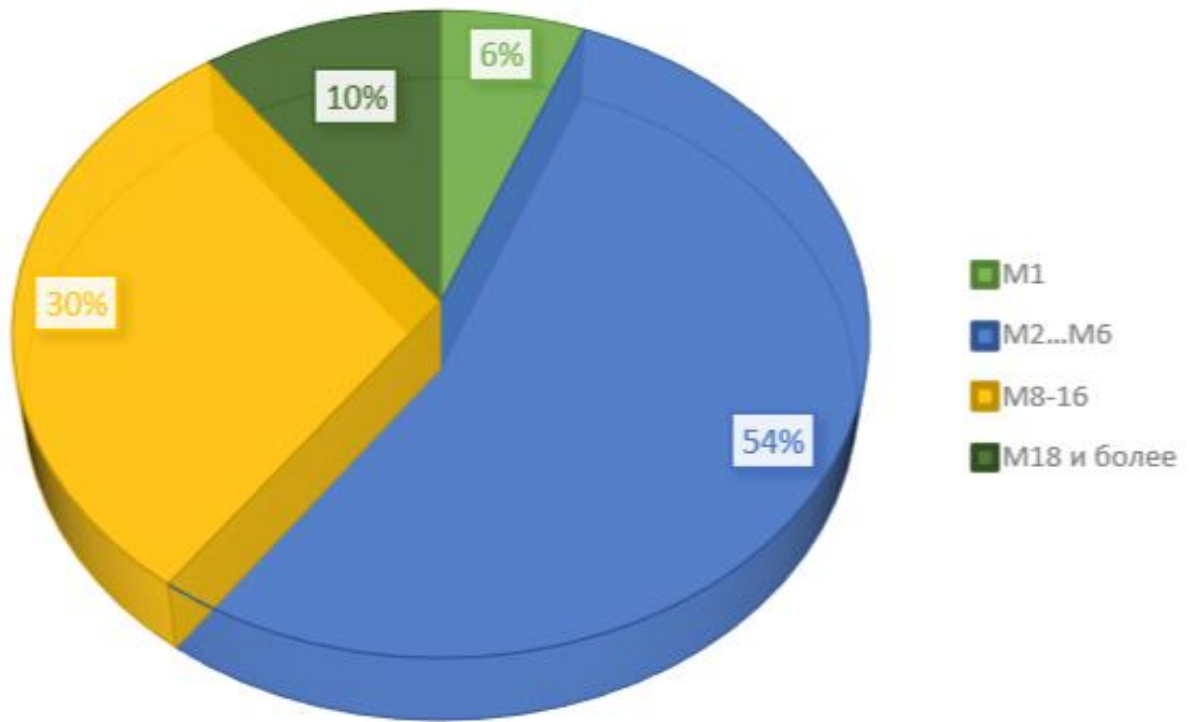


Рисунок 1.1.1 – Диаграмма распределения размеров внутренних резьб в зависимости от распространенности их применения в машино-приборостроении

На рисунке 1.1.2 показаны виды деталей с внутренней резьбой малых диаметров. Резьбы малых диаметров применяют в основном в приборостроении и электротехнической промышленности, резьбы средних диаметров – в автомобилестроении, станкостроении, авиастроении, сельхозмашиностроении, резьбы больших диаметров – в тяжелом машиностроении, нефтяной и газовой промышленности.

Удельный вес трудоемкости нарезания внутренних резьб M2...M6 составляет 8...10% от общей трудоемкости технологических процессов механической обработки деталей. Особенно он велик при обработке корпусных деталей, дисков, цилиндров, фланцев, в которых число резьбовых отверстий может быть весьма значительным. На рисунке 1.1.3 представлена диаграмма распределения методов обработки внутренних резьб малых диаметров.

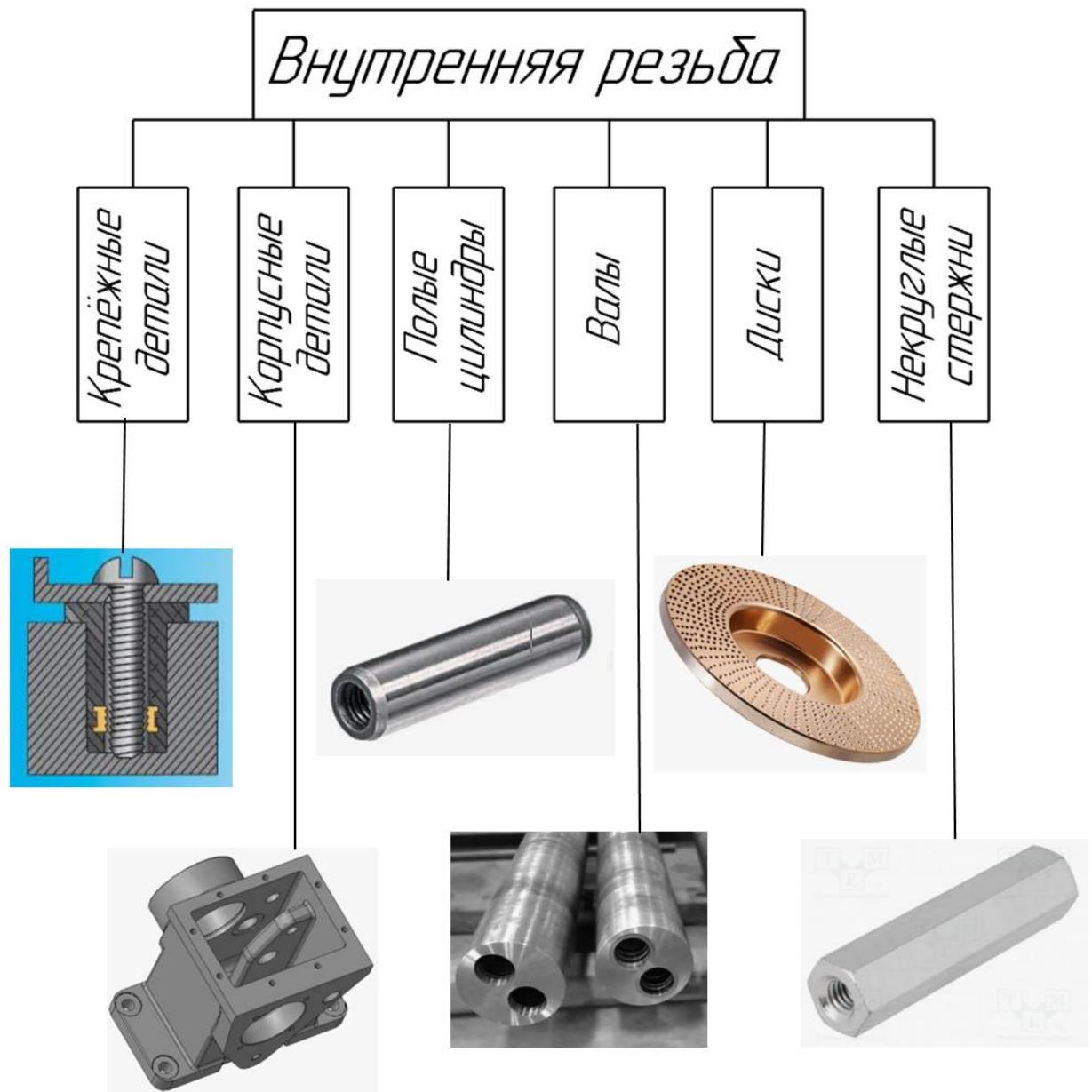


Рисунок 1.1.2 – Виды деталей с внутренней резьбой

Анализ диаграммы (рисунок 1.1.3), свидетельствует о том, что при обработке внутренних резьб малых диаметров во всех типах производства преобладает метод обработки резьб метчиками.

Существенные сложности возникают при обработке внутренних резьб малых диаметров в глухих глубоких отверстиях, где длина резьбы L превышает $3D$ (где D – диаметр резьбы). Например, для резьбы $M6 \times 1$ ($D=6$ мм, $P=1$ мм) это означает $L > 18$ мм. В таких случаях наблюдается низкая производительность, обусловленная необходимостью использования набора

метчиков (чернового, среднего и чистового), а также недостаточное качество резьбы из-за перекоса метчиков и проблем с удалением стружки.

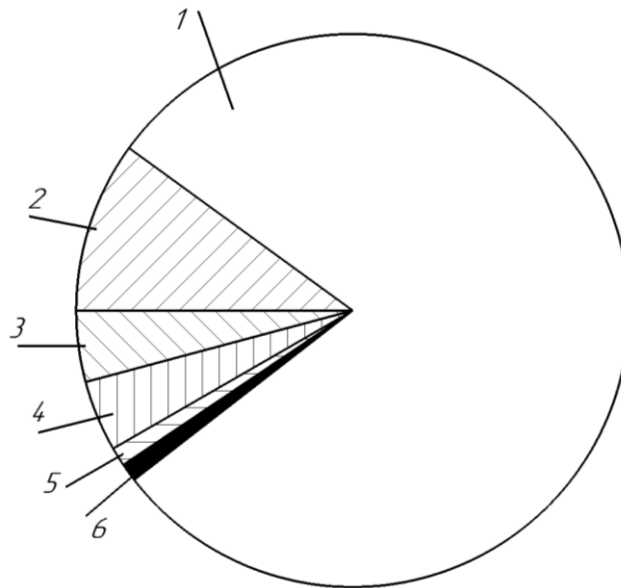


Рисунок 1.1.3 – Распределение методов обработки внутренних резьб малых диаметров: 1 – машинные метчики (80%), 2 – ручные метчики (10%), 3 – бесстружечные метчики (4%), 4 – гаечные метчики (4%), 5 – электрохимическая обработка (1%), 6 – электрофизическая обработка (1%)

Эти трудности связаны с малыми габаритами обрабатываемых изделий, низкой стойкостью режущего инструмента [13, 40, 41, 87, 108], несовершенством конструкции и неблагоприятными условиями работы режущих элементов метчика в зоне резания (интенсивное наростообразование, ограниченный доступ СОТС, накопление стружки и невозможность ее эффективного удаления из зоны контакта). Формирование внутренних резьб малых диаметров в глухих глубоких отверстиях является одним из наиболее сложных процессов металлообработки. Конструктивные особенности метчиков ограничивают возможности оптимизации геометрии рабочей части, прочность которой зачастую оказывается недостаточной, а подача СОТС и удаление стружки из зоны обработки затруднены. Обработка происходит практически “всухую”, что снижает стойкость инструмента и ограничивает скорость резьбообразования [37, 57, 67, 90, 123].

При автоматизации этого процесса часто происходит заклинивание и поломка мелкогабаритного режущего метчика в глухом глубоком отверстии из-за скопления стружки на рабочей части. Доля таких операций в общем объеме обработки внутренних резьб малых диаметров достаточно велика, что подтверждается анализом научно-технической информации в данной области (рисунок 1.1.4).

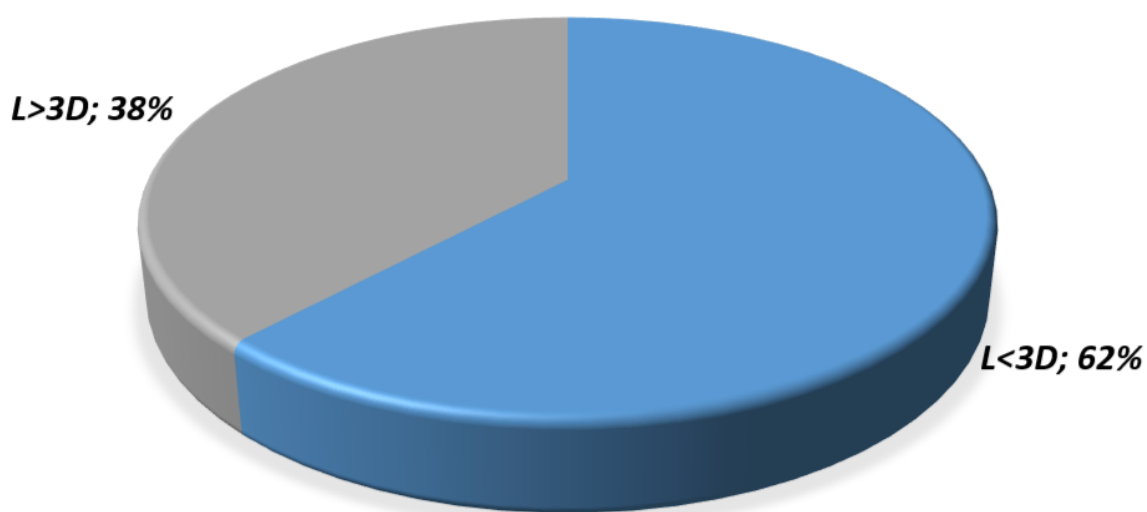


Рисунок 1.1.4 – Распределение видов отверстий при обработке внутренних резьб малых диаметров: 1 – L менее $3D$ (62%), 2 – $L > 3D$ (38%)

Исследованию закономерностей процесса формирования внутренних резьбовых поверхностей посвящены работы известных ученых: В.В. Матвеева [70-73], В.И. Шагуна [120-124], А.А. Грудова [32-37], Ю.Л. Фрумина [113], О.С. Андрейчикова [44, 103], А.Е. Стешкова [103], В.М. Меньшакова [75], Г.П. Урлапова [113], Родина П.Р. [102], В.С. Середы [105], А.Н. Резникова [100], А.И. Боярунаса [16], В.М. Эпштейна [128], В.Г. Якухина [129] и других. Результаты их работы внесли значительный вклад в развитие теории и практики формирования внутренних резьб.

Внутренняя резьба представляет собой сложную геометрическую форму. Стандарты [25, 28, 29] предусматривают контроль следующих параметров:

- а) обобщенной характеристики точности резьбовых отверстий - приведенного среднего диаметра, который учитывает несколько размерных параметров (средний диаметр, шаг, угол профиля);
- б) точности формы резьбовой поверхности (искривление оси резьбы на длине свинчивания; отклонения от идеальной винтовой поверхности, эллиптичность среднего диаметра и другие).

Контроль параметров внутренних резьб представляет собой сложную задачу, особенно применительно к резьбам малых диаметров, для которых использование существующих технических средств контроля зачастую невозможно. В этих случаях обеспечение требуемой точности достигается за счет оптимизации технологического процесса, использования высокоточного оборудования и инструмента, а также применения эффективных средств технологической оснастки.

Отсутствие эффективного и дифференцированного контроля значительно затрудняет объективную оценку влияния отдельных технологических факторов на точность и усложняет выбор оптимальных параметров процесса нарезания резьбы.

Анализ операций формирования внутренних резьб резанием показывает, что применение различных конструкций метчиков, технологической оснастки, режимов резания и СОЖ не всегда обеспечивает получение резьб с требуемой точностью. Это связано с выходом размеров резьбы за пределы установленных допусков (эффект “разбивания” резьбы) и несоответствием фактического профиля резьбы номинальному (эффект “подрезания” профиля) [52, 71].

Шероховатость винтовых поверхностей резьбы (R_a), получаемых режущими метчиками, обычно находится в диапазоне 5,0...10,0 мкм, и лишь в редких случаях достигает значений 2,0...5,0 мкм, что часто является недостаточным, особенно для точных резьб, герметичных резьбовых соединений и соединений с натягом [91, 124]. Метчики работают в сложных условиях. Силовое взаимодействие материала детали и режущих зубьев вызывает пространственно-напряженное состояние, а также деформации

кручения и изгиба метчика. Это приводит к изменению профиля резьбы и увеличению ее геометрических размеров. Деформация рабочей части метчика увеличивает площадь контакта зубьев с обрабатываемым материалом и, как следствие, приводит к возникновению дополнительного крутящего момента [71].

Удаление стружки из зоны резания и подача СОЖ в зону контакта рабочих поверхностей зубьев и обрабатываемого материала затруднены, особенно при обработке глухих отверстий. Использование различных паст перед обработкой не дает длительного эффекта, так как их действие ослабевает по мере продвижения рабочей части метчика в отверстие [13, 14, 87, 110, 114].

Процесс нарезания внутренних резьб малых диаметров также осложняется широким использованием в приборостроении конструкционных материалов с особыми физико-механическими свойствами. Обработка таких материалов сопряжена со значительными трудностями [10, 22, 92, 100, 106]. При “вывинчивании” метчика из отверстия в деталях, изготовленных из таких материалов, происходит скол режущих кромок, попадание частиц стружки под задние поверхности, а также взаимодействие задних поверхностей зубьев с заусенцами и неровностями на стенках резьбы [12, 71].

В результате совокупности перечисленных факторов, процесс формирования внутренних резьб режущими метчиками характеризуется частыми поломками последних. По данным А.А. Грудова [35], поломки приводят к выходу из строя 50...70% режущих метчиков размеров М2...М6. Кроме того, значительное количество метчиков (около 100%) размеров М2...М6 снимается из эксплуатации из-за несоответствия нарезаемых резьб техническим условиям. Для достижения требуемого качества внутренних резьб малых диаметров часто прибегают к ручному нарезанию или дополнительной ручной калибровке резьбы, полученной машинным способом, а также к увеличению количества метчиков в комплекте, что значительно снижает производительность процесса [115].

Разнообразие метчиков и непрерывное их совершенствование [15, 93, 102] свидетельствуют об отсутствии приемлемых вариантов для работы в условиях автоматизированного производства с широкой номенклатурой деталей из чёрных, цветных металлов и различных труднообрабатываемых сплавов, особенно при формировании внутренних резьб малых диаметров в глухих глубоких отверстиях.

В качестве оборудования для автоматизированного нарезания резьбы в единичном, мелкосерийном и серийном производствах применяют станки с ЧПУ, однако, достаточно показать размеры деталей первых габаритов [20], чтобы сделать вывод о том, что даже они рассчитаны на обработку довольно крупных деталей (табл. 1.1.1, 1.1.2) и неприемлемы для обработки внутренних резьб малых диаметров, особенно в глухих глубоких отверстиях. Кроме того, почти все эти станки имеют большие размеры и вес, занимают значительные производственные площади. Помимо указанных в таблицах моделей используются серийно выпускаемые сверлильные и резбонарезные станки. Обработка резьбовых отверстий на станках с ЧПУ осуществляется с использованием специализированных программируемых циклов, позволяющих повысить производительность по сравнению с обработкой на универсальном оборудовании [129], однако ограниченная возможность качественного и быстрого формирования внутренних резьб малых диаметров в глухих глубоких отверстиях сдерживает их эффективность в условиях гибкой автоматизации производства (рисунок 1.1.5).

Таблица 1.1.1 – Конструктивно-технологические характеристики корпусных деталей и рекомендуемые модели станков с ЧПУ

Предельная масса деталей, кг	Предельная рабочая поверхность стола, мм	Модели обрабатывающих центров
500	1500x570	MAXXmill 630, T4000, NHM 5000, NHM 6300, NHM 8000, DNM 4000, DNM 500/50 II, DNM 5700L, DVF 5000, ИР320ПМФ4

Таблица 1.1.2 – Конструктивно-технологические характеристики деталей тел вращения и рекомендуемые модели станков с ЧПУ

Предельные параметры деталей			Модели обрабатывающих центров
D , мм	L , мм	Масса, кг	
320	525	50	PUMA GT2100, PUMA 2450M, Puma 1000, Lynx2100, Lynx235 II, Quick Torn 10N-ATC MAZAK, Emcoturn E65, ИРТ180ПМФ4



а

б

в

Рисунок 1.1.5 – Общий вид станка мод. Emcoturn E65 (а) и схемы выполняемых на нем операций центрального (б) и нецентрального (в) резбонарезания

Целесообразность использования резьбонарезных станков до настоящего времени для различных типов обрабатываемых деталей определяется не только необходимостью выполнения резьбонарезной операции, но и невозможностью на других станках достичь требуемой точности и надёжности процесса обработки резьб малых диаметров.

Основные особенности и проблемы при формообразовании внутренних резьб малых диаметров:

1) для формообразования резьб М2...М6 наиболее широко применяют режущие и деформирующие метчики, каждый из которых обладает набором особенностей, связанных с явлениями, возникающими в зоне контакта инструмента и детали при формообразовании резьбовой поверхности;

2) трудоемкость нарезания внутренних резьб М2...М6 составляет 8...12% от общей трудоёмкости технологических процессов механической обработки деталей. Особенно он велик при обработке корпусных деталей, дисков, цилиндров, фланцев;

3) величина переднего угла и заднего угла определяются толщиной срезаемого слоя. Это объясняется тем, что радиус округления режущей кромки соизмерим с толщиной стружки;

4) деформация срезаемого слоя различна в верхней и нижней частях. Деформация в нижней части срезаемого слоя вследствие отрицательного значения переднего угла значительно больше, чем в верхней, при этом передний угол зуба не изменяется и имеет положительное значение;

5) перераспределение величин срезаемых слоёв между зубьями метчика. Как следствие, на одних зубьях имеет место пластическое деформирование, а на других — переполнение стружкой отдельных стружечных канавок, что повышает вероятность поломки метчика;

6) трудности, связанные с малыми габаритами изделий и низкой надёжностью режущего инструмента. Это вызвано несовершенством конструкций и условиями работы зубьев метчика в зоне резания (активное

наростообразование, плохой доступ смазочно-охлаждающих технологических средств, наличие пакетирования стружки и невозможность её удаления из зоны контакта инструмента и заготовки);

7) трудности, связанные с накоплением стружек в глухих глубоких отверстиях. В процессе обработки на дне глухих отверстий накапливаются отделившиеся стружки, а в конце резьбовой части в момент остановки метчика образуются стружки, неотделённые от основной массы обрабатываемого материала;

8) трудности, связанные с взаимодействием зубьев метчика со стружками. При обратном ходе зубья взаимодействуют со стружками, что приводит к резкому увеличению крутящего момента и выкрашиванию режущих кромок метчика;

9) поломка метчика. Это происходит из-за резкого возрастания момента при реверсе инструмента, например, из-за наличия отверстия под резьбу недостаточной глубины или пакетирования стружки в канавках метчика.

Для решения некоторых проблем предпринимают такие действия как:

а) исключение взаимодействия режущих зубьев метчика со срезанной стружкой за счёт удаления её из отверстия в процессе обработки;

б) использование специальных метчиков, например, с винтовыми стружечными канавками, которые позволяют выводить стружку из нарезаемого отверстия, повышать точность нарезаемой резьбы и снижать её шероховатость;

в) применение ультразвуковых колебаний для уменьшения силы резания и трения.

Точность внутренних резьб М2...М6 определяется параметрами инструмента и условиями обработки. Отклонения точностных характеристик и режимов приводят к браку и снижению эффективности на данной операции.

Проведенный анализ показывает, что проблема формирования внутренних резьб малых диаметров в глухих глубоких отверстиях остается

актуальной. Для решения практических задач, связанных с повышением точности и интенсификацией процесса, необходимо проанализировать факторы, снижающие точность и стабильность, на основе комплексного изучения закономерностей процесса резбообразования в рамках всей технологической системы, а также с учетом технологических и производственных факторов.

В настоящее время отсутствуют единые, научно обоснованные рекомендации по формированию внутренних резьб малых диаметров, что часто не позволяет обеспечить требуемые параметры качества резьб в производственных условиях.

В связи с этим возникает необходимость в проведении комплексного, систематизированного исследования влияния процессов формирования резьб в глухих глубоких отверстиях метчиками на качество внутренних резьб и производительность обработки.

1.2 Анализ прогрессивных конструкций метчиков для внутренней резбообработки

В современной практике машино- и приборостроения для резбообработки мелкоразмерных резьб в глухих глубоких отверстиях широко применяются метчики различных конструкций и с различными геометрическими параметрами. Выбор конкретного типа инструмента определяется условиями работы и свойствами обрабатываемого материала (см. рисунок 1.2.1) [52, 71].

Для формирования резьбы в изделиях из пластичных материалов, таких как легированные высокопрочные и низкоуглеродистые стали, а также алюминиевые сплавы, используются машино-ручные метчики двух типов: режущие (со стружечными канавками) (рисунок 1.2.1, а) и пластически деформирующие (бесстружечные) (рисунок 1.2.1, б).

Снижение трения при обработке обеспечивается применением метчиков с режущими элементами (зубьями), расположенными в шахматном порядке на калибрующей части инструмента (срезаны через один зуб) (рисунок 1.2.1, в).

Для создания резьб в сложных для обработки материалах и сплавах применяются режуще-деформирующие метчики (рисунок 1.2.1, г). Инструменты, сочетающие резание и выглаживание в пределах одного зуба, называются метчиками с режуще-выглаживающими зубьями (рисунок 1.2.1, д).

Нарезание глухих резьбовых отверстий выполняется метчиками с канавками, ориентированными по винтовой линии (рисунок 1.2.1, е).

Улучшение качества поверхности и точности резьбы достигается применением ступенчатых метчиков (рисунок 1.2.1, ж), в которых рабочая часть состоит из двух последовательных зон: нарезающей и выглаживающей.

Повышение производительности резьбонарезания обеспечивают метчики с внутренней полостью (рисунок 1.2.1, з), позволяющие подавать смазочно-охлаждающую жидкость (СОЖ) непосредственно в зону резания для охлаждения инструмента.

Для нарезания внутренних резьб большого диаметра (свыше 50 мм) применяются метчики колокольного типа (рисунок 1.2.1, и), особенностью которых является сборная структура, включающая отдельные режущие элементы.

К метчикам, используемым для нарезания резьбы, предъявляется ряд ключевых требований:

- универсальность: инструмент должен быть пригоден для работы как на машинном оборудовании, так и при ручном нарезании резьбы;
- простота применения: процесс нарезания резьбы должен быть максимально простым и не требовать сложных манипуляций;

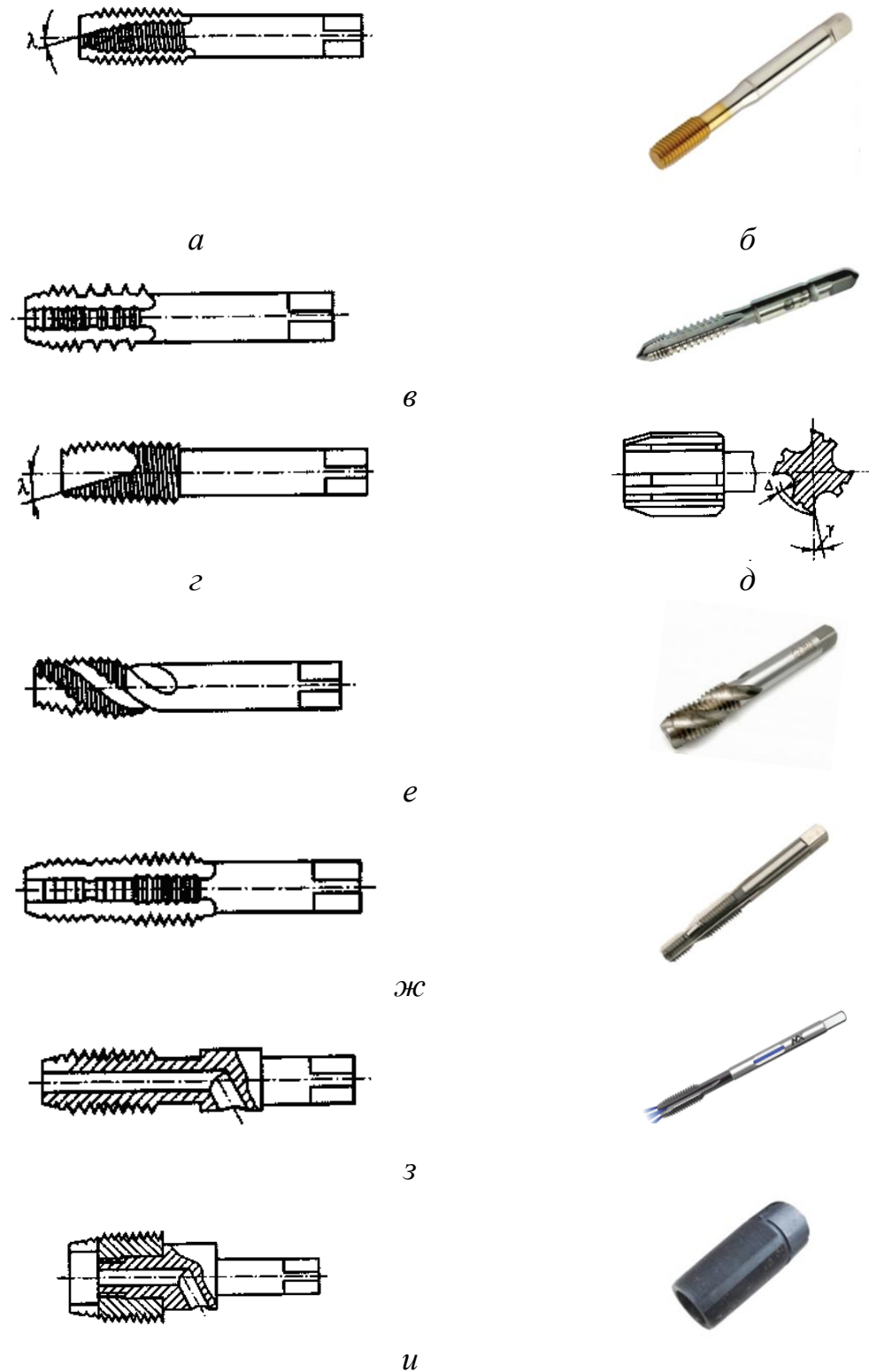


Рисунок 1.2.1 – Конструкции некоторых типов метчиков: *а* – машинно-ручной (режущий); *б* – пластически деформирующий (бесстружечный); *в* – с шахматным расположением зубьев; *г* – режуще-деформирующий; *д* – с режуще-выглаживающими зубьями; *е* – с винтовыми канавками; *ж* – ступенчатый; *з* – с внутренним подводом СОТС; *и* – колокольного типа

- широкий спектр обрабатываемых материалов: инструмент должен обеспечивать обработку различных материалов, включая пластичные металлы (алюминий, медь, латунь), высокопрочные стали (в том числе нержавеющей), чугун, бронзу, а также твердые и мягкие пластики;
- высокая точность центрирования: важна для равномерного распределения нагрузки, что положительно сказывается на качестве резьбы, снижает износ и риск поломки или заклинивания инструмента;
- продолжительный срок службы: достигается за счет возможности многократной переточки рабочей части инструмента, что позволяет восстанавливать его режущие свойства;
- минимизация нагрева: эффективное охлаждение рабочей зоны достигается подачей смазочно-охлаждающих жидкостей (СОЖ) или смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС) непосредственно в зону резания, в том числе через специальные каналы внутри инструмента;
- самозатягивание: конструкция метчика должна обеспечивать эффективное нарезание резьбы за счет эффекта самозатягивания;
- точность резьбы: достигается путем повышения точности изготовления метчиков и оптимизации процесса формообразования резьбы.

По принципу формирования резьбового профиля метчики классифицируются на: а) режущие (РМ); б) пластически деформирующие (ПДМ); в) режуще-деформирующие (РДМ).

Режущие метчики, в свою очередь, могут быть ручными, машинно-ручными и машинными, в то время как метчики пластической деформации и режуще-деформирующие обычно изготавливаются как машинные.

При работе с мелкоразмерными метчиками выбор конструкции и условий эксплуатации приобретает особое значение. Несмотря на значительное количество разработанных конструкций и схем резания [54, 100, 109, 120], большинство из них предназначены для узкоспециализированных областей применения. Широкое распространение разнообразных предложений по модернизации метчиков, вызванное их активным

использованием в промышленности и, одновременно, недостаточной надежностью, свидетельствует о том, что проблема формирования внутренних резьб малых диаметров, особенно в глухих глубоких отверстиях, до сих пор не решена в полной мере [40, 41].

Сложность изготовления и ограниченная область применения специальных метчиков привели к увеличению доли импортного инструмента, часто отличающегося высокой стоимостью. В настоящее время отечественное инструментальное производство удовлетворяет потребность в метчиках размеров М2...М6 лишь частично (на 50...60%), что вынуждает многие предприятия самостоятельно изготавливать метчики для собственных нужд, несмотря на доступность зарубежных аналогов. Тем не менее, инструмент, изготовленный кустарным способом, часто не соответствует требованиям качества и специфическим условиям, предъявляемым к различным конструкциям метчиков, а также отличается от стандартов, установленных ISO. Стоимость качественного инструмента также остается высокой.

Начиная с конца 1980-х годов, как в России, так и за рубежом, для формирования внутренних резьб малых диаметров в деталях из труднообрабатываемых металлов и сплавов все чаще используется метод пластического деформирования (рисунок 1.2.1, б) [19, 54, 85, 106]. Этот метод позволяет добиться более высокого качества (по точности, шероховатости поверхности и прочности), стабильности процесса резьбообразования и более высокой производительности по сравнению с применением режущих метчиков.

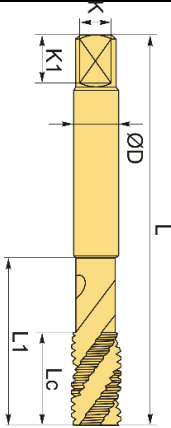
Одним из факторов, ограничивающих более широкое применение пластически деформирующих метчиков, является их высокая стоимость, повышенные требования к точности размеров отверстий под резьбу, а также образование заусенцев и деформаций в процессе “течения” металла при формировании резьбы [50]. Специализированные производители инструмента применяют химико-термическую обработку рабочей части метчиков и наносят на рабочие поверхности зубьев покрытия из хрома, карбида титана и

других материалов. Стоимость таких метчиков достаточно высока. Например, немецкая компания “GSR” предлагает пластически деформирующие метчики размеров M2...M6 без канавок для смазки рабочей части по цене 25...30 € за штуку, а метчики со смазочными канавками для обработки нержавеющей сталей – по цене 65...75 € за штуку. В условиях постоянного роста объемов производства возникает потребность в массовом инструменте, таком как метчики (режущие и пластически деформирующие), который должен быть простым и экономичным в изготовлении.

Для формообразования мелкоразмерных резьб M2...M6 широко используют различные конструкции зарубежных и отечественных машинных метчиков (таблица 1.2.1).

Таблица 1.2.1 – Примеры характеристик зарубежных и отечественных машинных метчиков

№п/п	Тип	Конструктивные особенности	Вид
1.	TB844 MF Combo	Машинный метчик из быстрорежущей стали HSS-E со спиральной стружечной канавкой с углом спирали 40 градусов. Подходит для глухих отверстий, нарезания метрической резьбы в стали, нержавеющей стали, чугуна и цветных металлах. Для нарезания метрической резьбы точного профиля M6 с шагом 1 мм. Класс резьбы 6H. Заходная часть С (2-3 витка). С покрытием Var (отпуск в атмосфере пара). Для глухих отверстий. Изготовитель YG-1 (Южная Корея). Изготовители аналогов: Sandvik, SECO, WALTER, Kennametal, ISCAR, Tungaloy, Taegutec, Mitsubishi, Kyocera, Sumitomo, Hitachi, Dijet, Valenite и др	

2.	T880	Покрытие: TiN. Группа обрабатываемых материалов: Р-стали, М-нержавеющие стали, К-чугун, Н-цветные сплавы Количество зубьев: 3. Диаметр хвостовика D2: 7. Длина шейки L3: 30. Общая длина L2: 80. Серия: T8804. Тип отверстия: 2.5xD Глухое отверстие. Тип канавки: Винтовая канавка. Заходная часть по DIN2197: С. Длина резьбы L1: 10. Размер квадрата К: 5.5. Длина квадрата KL: 8. Диаметр сверла D1: 6. Материал инструмента: Быстрорежущая сталь HSS. Размер D1:M7. Шаг P: 1	
3.	T781	Метчик из быстрорежущей стали ALPHA-TAP HSS(M2) DIN376, M2.5X0.45 6H 50.0L T7814176. Группа обрабатываемых материалов: Р-стали, М-нержавеющие стали, К-чугун, Н-цветные сплавы. Количество зубьев: 3. Диаметр хвостовика D2: 2.8. Длина шейки L3: 15. Общая длина L2: 50. Тип отверстия: 3.5xD Сквозное отверстие. Тип канавки: Винтовая подточка. Заходная часть по DIN2197: В. Длина резьбы L1: 9. Размер квадрата К: 2.1. Длина квадрата KL: 5. Диаметр сверла D1: 2.05. Материал инструмента: Быстрорежущая сталь HSS. Размер D1:M2.5	
4.	TD804 Combo	Для нарезания метрической резьбы точного профиля M5 с шагом 0.8 мм. Класс резьбы 6H. Многофункциональный универсальный машинный метчик из быстрорежущей стали HSS-E со спиральной стружечной канавкой с углом спирали 60 градусов. Заходная часть С (2-3 витка). С покрытием TiN (нитрид титана). Для глухих отверстий.	

5.	E220-SJE-020040L	Машинный метчик M2x0,4 HSS-E. Метчик из быстрорежущей стали HSS-E с углом спирали 60 градусов. Преимущества: Экономичный метчик для нарезания резьбы в стальных деталях. С покрытием AlCrN (хромонитрид алюминия). Внешнее охлаждение. Стандарт размер JIS. Класс точности резьбы в отверстии 6H. Первый выбор по углеродистой и легированной стали (<35HRC). Возможное применение: нержавеющая сталь. Родина бренда - Intool (Россия), Производитель – Китай.	
6.	Beltools HSS	Метчик M6x0,75 машинно-ручной HSS ГОСТ 3266-81 Beltools в Белгороде Комплектный метчик M6 шаг 0,75 мм для нарезания метрической правой резьбы машинно-ручным способом. Материал изготовления - HSS. Универсальная область применения (ручным способом или на станочном оборудовании), широко используется во всех сферах промышленности, металлообработки, где необходим специализированный инструмент для нарезания резьбы в метрических стандартах на токарных и сверлильных станках. Изготовитель – Beltools (Белгород, Россия)	
7.	Beltools K35C	Метчик Beltools M2,5x0,45 машинно-ручной 6H K35C глухой TiN винтовой L=50мм. Твердосплавный метчик машинно-ручной для нарезания метрической резьбы. Шаг резьбы составляет 0,45 диаметр - 2,5 мм. Изготовлен из сплава K35C с TiN покрытием. Твердосплавный метчик применим для нарезания резьбы в твердых труднообрабатываемых материалах. Инструмент соответствует стандарту DIN371. Изготовитель – Beltools (Белгород, Россия).	

Несмотря на широкий выбор конструкций мелкогазмерных метчиков, их недостаточная стойкость, частые поломки и высокий процент брака деталей из-за проблем с резьбовыми отверстиями затрудняют обеспечение требуемого качества при формировании внутренних резьб малых диаметров в глухих глубоких отверстиях. Существующее технологическое оборудование не всегда способно обеспечить необходимую надежность и, следовательно, производительность процесса.

Анализ показывает, что задача формирования внутренних резьб малых диаметров с требуемой точностью в глухих глубоких отверстиях до сих пор остается актуальной. Для решения практических задач, связанных с повышением точности и интенсификацией процесса, необходимо проанализировать причины, снижающие точность и ухудшающие стабильность, на основе выявления закономерностей резьбообразования в рамках технологической системы и с учетом технологических и производственных условий.

Таким образом, существует необходимость в проведении комплексного, систематизированного исследования влияния процессов формирования мелкогазмерных резьб метчиками в глубоких глухих отверстиях на качество и производительность обработки.

1.3 Анализ существующих исследований процессов мелкогазмерной резьбообработки

В настоящее время существует значительное количество исследований, посвященных обработке отверстий малого диаметра метчиками. Однако, чаще всего, авторы ограничиваются изучением влияния технологических параметров на точность и производительность формирования внутренних резьб малых диаметров в сквозных отверстиях. Например, в работах В.В. Матвеева [71, 72] для выявления взаимосвязей между размерами получаемой резьбы и различными технологическими факторами при нарезании резьб

машинными метчиками, предложена “теория точности”. Эта теория базируется на предположении, что размеры рабочей части метчика копируются в материале заготовки при резьбонарезании режущими метчиками. Автором предложена зависимость для расчета приведенного среднего диаметра резьбового отверстия $d_{np.p.}$:

$$d_{np.p.} = D_n + (1,732\Delta\Pi_1 + \Delta\Pi_2) - (1,732\Delta l_{отв} + \Delta d_{отв}) \quad (1.3.1)$$

где D_n – производящий средний диаметр метчика; $\Delta\Pi_1$ – погрешность перемещения любой точки, лежащей на поверхности метчика, измеренная в осевом направлении; $\Delta\Pi_2$ – погрешность перемещения любой точки, лежащей на поверхности метчика, измеренная в диаметральной плоскости; $\Delta l_{отв}$ – деформация резьбового отверстия, измеренная вдоль оси; $\Delta d_{отв}$ – деформация резьбового отверстия диаметральной.

При рассмотрении взаимосвязей обобщенных факторов с входными данными В.В. Матвеевым дана качественная и количественная оценка, позволяющая осуществлять прогноз точности резьбовых поверхностей и производить разработку практических рекомендаций.

Производящий средний диаметр метчика D_n зависит от среднего диаметра резьбы рабочей части метчика d_2 , отклонений шага резьбы от номинального значения Δd_1 , отклонений половины углов профиля от номинального значения Δd_2 , а также от величин упругих (Δd_3 – депланация поперечного сечения, Δd_{10} – растяжение и сжатие шагов при изгибе) и тепловых деформаций Δd_5 :

$$D_n = d_2 + \Delta d_1 - \Delta d_2 + \Delta d_3 + \Delta d_{10} + \Delta d_5. \quad (1.3.2)$$

Величины d_2 , Δd_1 и Δd_2 характеризуют исходную геометрию рабочей части метчика и принимаются во внимание при расчете. Допуски на метчики корректируются на основе результатов расчета и контролируются в процессе их производства.

Для учета деформации Δd_3 , возникающей при депланации метчика, в работе [71] предложено следующее выражение:

$$\Delta d_3 = 1,732 W_\psi, \quad (1.3.3)$$

где W_ψ – максимальное значение депланации в осевом направлении. Для трехперых метчиков [71, 72]:

$$W_\psi = 190 \frac{M_{кр}}{10^8 \left(\frac{d_1}{2} \right)^3}, \quad (1.3.4)$$

где $M_{кр}$ – крутящий момент, возникающий при резбообразовании; d_1 – внутренний диаметр резьбы метчика.

При формировании резьб малых диаметров величина переднего угла и заднего угла определяется толщиной срезаемого слоя, что объясняется соизмеримостью радиуса округления режущей кромки и толщины стружки.

Радиус округления режущих кромок зубьев составляет 12...15 мкм. Толщина срезаемого слоя определяется конструкцией заборного участка метчика. Зависимость толщины срезаемых слоев от угла заборного конуса для метчиков малых диаметров представлена на рисунке 1.3.1.

Существенное уменьшение глубины резания каждым зубом оказывает значительное влияние на процесс резания и сопутствующие явления.

При резании тонких стружек скругленной режущей кромкой возникает эффект отрицательного переднего угла, абсолютное значение которого увеличивается с уменьшением толщины срезаемого слоя (рисунок 1.3.2).

Срезаемый слой деформируется неравномерно: деформация в нижней части, обусловленная отрицательным передним углом, значительно превышает деформацию в верхней части. При этом фактический передний угол зуба остается положительным и неизменным.

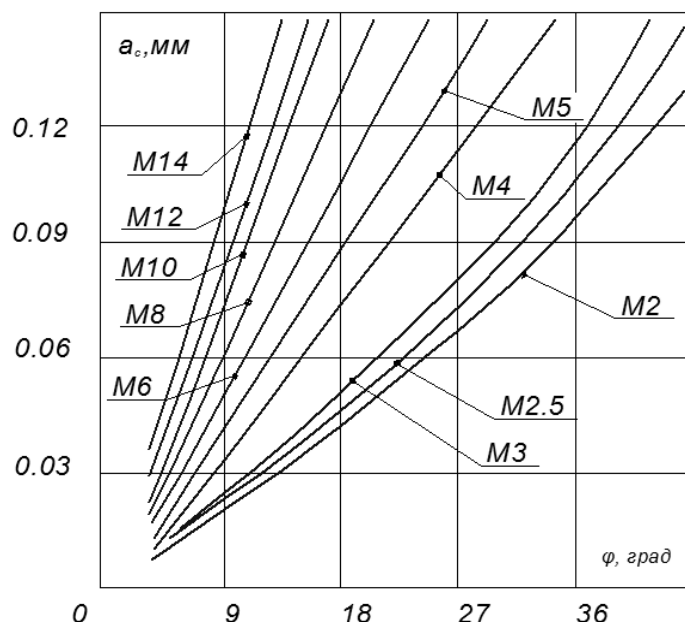


Рисунок 1.3.1 – Зависимость толщины срезаемых слоев от угла заборного конуса метчика

Для оценки надежности операции резьбонарезания [70] применяются вероятностные модели, в частности, вероятность безотказной работы P_{on} :

$$P_{on} = P_{p1} P_{120}, \quad (1.3.5)$$

где P_{p1} – вероятность безотказной работы по точностным параметрам;
 P_{120} – вероятность безотказной работы, обусловленная прочностью инструмента.

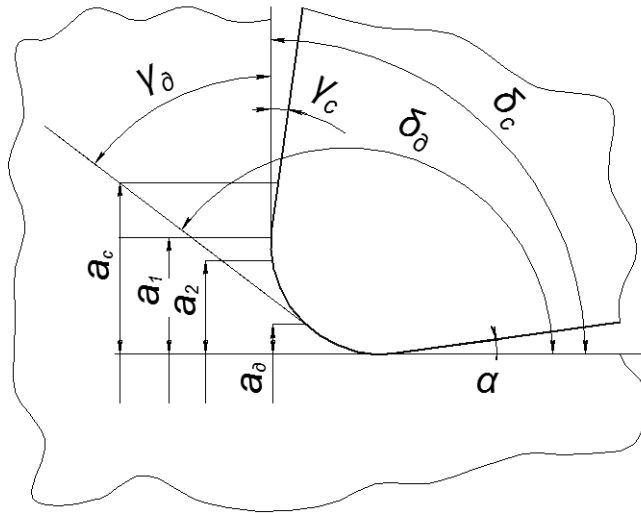


Рисунок 1.3.2 – Схема резания зубом метчика со скругленной режущей кромкой

В формуле (1.3.5) предложено учитывать удельный вес каждой составляющей при оценке надежности (P_{on}). Так, при обработке резьб большого диаметра (более 20 мм) основными причинами отказов являются параметрические отказы (недостаточная точность резьбы, высокая шероховатость и другие дефекты, приводящие к браку). При обработке резьб малого диаметра на первый план выходят отказы, связанные с функционированием (поломки инструментов). Однако, несмотря на указание о влиянии различных типов отказов в зависимости от размера резьбы, авторы не приводят конкретных значений, составляющих выражения (1.3.5).

А.В. Литвиненко в своей работе установил, что отказы, связанные с функционированием, характерны не только для метчиков диаметром менее 20 мм, но и для инструмента в диапазоне от М8 до М42, который был исследован в данной работе. При этом причинами отказов метчиков при обработке конструкционных углеродистых сталей являются: износ инструмента (45%), выкрашивание и скол режущих кромок (40%), потеря точности (8%), разрушение рабочей части (7%). Была предложена модель, описывающая формирование отказов метчиков с учетом одновременного влияния постепенных и внезапных отказов:

$$P_{on} = \left(0,5 + \Phi \left(\frac{h_3 - h_0 - k(t - t_0)}{\sqrt{\sigma_h^2 + \sigma_k^2 (t - t_0)^2}} \right) \right) e^{-\lambda t}, \quad (1.3.6)$$

где λ – параметр экспоненциального распределения, зависит от диаметра, шага резьбы и твердости обрабатываемого материала ($\lambda = Cd^{-2,91}P^{-2,51}HB^{2,83}$); h_3 – допустимая величина износа задних поверхностей зубьев метчика, определяется как:

$$h_3 = C_\alpha C_P \frac{Ptg\varphi}{ztg\alpha}, \quad (1.3.7)$$

h_0 – среднее значение износа на этапе приработки; t_0 – среднее время приработки; σ_h^2 и σ_k^2 – среднеквадратические отклонения размеров метчиков и скорости изнашивания задней поверхности зубьев. Однако, как отмечалось ранее, данные зависимости справедливы для метчиков в диапазоне М8...М42. Для метчиков М2...М6 применение зависимостей (1.3.6) невозможно, что требует дополнительных теоретических и экспериментальных исследований.

Выражение для определения предельно допустимого износа было получено в работе А.А. Грудова [32-37]. Зависимость позволяет оценить предельно допустимый износ по задней поверхности при обработке углеродистой конструкционной стали следующим образом:

$$h_3 = \frac{C_{h_3} d^q}{\frac{1}{V^u a^g \alpha^s}}, \quad (1.3.8)$$

где C_h – коэффициент износа; d – диаметр метчика; V – скорость резания; a^g – толщина срезаемого слоя; α^s – задний угол зуба метчика; $C_h, q, \frac{1}{u}, g, s$ – коэффициенты и показатели степени, соответственно.

Однако, данные зависимости не учитывают влияние крутильных колебаний, которые возникают при обработке внутренних резьб и увеличивают путь, пройденный зубом метчика за один цикл резбообработки. Известно, что износ напрямую связан с пройденным путем. Кроме того, не принимается во внимание предварительный износ инструмента и его влияние на скорость последующего износа.

Наряду с определением предельно допустимого износа, А.А. Грудовым были установлены взаимосвязи между стойкостью инструмента и параметрами процесса резбообработки:

$$T_3 = \frac{C_T d^{q'} \alpha^{s'}}{V \left(\frac{1}{u}\right)' a^{g'} b^{\rho'} (\sin \varphi)^{k'}}, \quad (1.3.9)$$

где b – ширина срезаемого слоя; φ – угол заборного конуса; $C_T, q', \left(\frac{1}{u}\right)', g', \rho', k'$ – безразмерный коэффициент и показатели степени, соответственно.

В работе [45] для расчета стойкости метчиков, учитывая наличие крутильных колебаний, получено следующее выражение, определяющее период стойкости:

$$T_3 = \frac{C_T d^{x_T} V}{P^{y_T} (V^{m'+1} + 0,210 V^{m'} A_\varphi f)}, \quad (1.3.10)$$

где P – шаг резьбы; d – номинальный диаметр метчика; A_φ – линейная амплитуда колебаний; f – частота колебаний; C_T , x_T , y_T , m' – нормативные справочные коэффициенты.

Выражения (1.3.9 – 1.3.10) носят эмпирический характер и определены для конкретного диапазона размеров метчиков. Их применение для оценки стойкости при резбообразовании в глухих глубоких отверстиях метчиками М2...М6 некорректно.

Для расчета крутящего момента в работе [71] предложено следующее выражение:

$$M_{кр} = M_p + M_{тр.л.} + M_{тр.с.} + M_{тр.1} + M_{тр.2} + M_{тр.3}, \quad (1.3.11)$$

где M_p – крутящий момент, затрачиваемый на “чистое” резание; $M_{тр.л.}$ – крутящий момент трения, возникающий из-за воздействия осевых и радиальных нагрузок на кромке зуба; $M_{тр.с.}$ – крутящий момент трения стружки о канавки метчика; $M_{тр.1}$, $M_{тр.2}$, $M_{тр.3}$ – крутящие моменты трения зубьев метчика о витки резьбы, обусловленные скручиванием тела метчика и деформацией его сечений, разностью радиальных составляющих сил резания, а также растяжением и сжатием шагов метчика под действием изгибающего момента, приложенного к хвостовику. Анализ данной работы демонстрирует, что основная часть крутящего момента при обработке конструкционной стали и корректной наладке расходуется на M_p и составляет 85...90 % от общего крутящего момента $M_{кр}$. Остальная часть приходится на составляющие момента резания. Автором также были определены зависимости составляющих силы резания по мере входа i -го зуба метчика в обрабатываемое отверстие и их зависимость от угла наклона заборного конуса. Однако, эти зависимости разработаны для метчиков М8...М27 и не применимы при

проектировании процессов резьбонарезания в глубоких глухих отверстиях малых диаметров М2...М6.

Ф.Н. Канареевым [53] были определены соотношения, основанные на классической теории стружкообразования при резании металлов, разработанной Н.Н. Зоревым. Для описания крутящего момента предложено следующее выражение:

$$M_{кр} = \sum_{i=1}^z F_{\tau i} R_i k_{\varepsilon}, \quad (1.3.12)$$

где $M_{кр}$ – крутящий момент сил резания при обработке резьбового отверстия; $F_{\tau i}$ – тангенциальная сила резания на i -м зубе; R_i – расстояние от центра тяжести срезаемого слоя до оси метчика; k_{ε} – безразмерный коэффициент, зависящий от угла наклона стружечной канавки; i – номер зуба метчика, участвующего в резании; z – количество режущих зубьев.

Зависимость (1.3.12) описывает крутящий момент сил резания, затрачиваемый на “чистое” резание, т.е. без учета контакта задних и боковых поверхностей инструмента с обрабатываемым материалом и возникающего из-за этого контакта момента сил трения. Кроме того, не принимаются во внимание подрезание ранее сформированной боковой поверхности резьбы, вызванное скручиванием метчика, и влияние износа инструмента на силовые составляющие процесса резьбообработки.

В работе [66] предложены аналитические выражения и зависимости, составляющих силы резания для расчета крутящего момента на режущей части метчика, основанные на известных представлениях о механике стружкообразования.

Для технологических расчетов, в справочнике [107], необходимых для разработки операций внутреннего резьбонарезания, рекомендуются эмпирические зависимости моментов сил резания:

$$M_{кр} = 10C_{M_{кр}} D^q P^y K_P, \quad (1.3.13)$$

где $C_{M_{кр}}$, q , y – коэффициенты, учитывающие особенности обрабатываемого материала, используемой СОТС, конструкцию инструмента и его геометрические параметры, соответственно; D – диаметр обрабатываемой резьбы; P – шаг резьбы; K_P – поправочный коэффициент.

Данная модель имеет ограниченную область применения в связи с тем, что она имеет эмпирический характер построения.

Для процесса нарезания метрических резьб машинными метчиками в работе [15] предложено следующее выражение:

$$M_{кр} = C_M \frac{d^{1,25} P^{1,75} z^{0,2}}{(tg\varphi)^{0,2}}, \quad (1.3.14)$$

где C_M – безразмерный коэффициент; z – число режущих зубьев метчика; φ – угол режущей части.

Анализ существующих исследований показывает, что, несмотря на большое количество разработанных моделей, все они имеют ограниченную применимость, обусловленную специфическими условиями моделирования, и не позволяют в полной мере описать особенности процесса внутренней мелкоразмерной резьбообработки в глухих глубоких отверстиях.

1.4 Анализ существующих методов мелкоразмерной резьбообработки в глухих глубоких отверстиях

Резьбовая поверхность может быть получена как с использованием формообразующих технологических процессов, так и с помощью методов механической обработки. В первом случае резьба формируется из жидкого, порошкообразного или волокнистого материала путем заливки формы

заданной формы и размеров. При применении процессов литья происходит последующее затвердевание материала, а при применении формовочных процессов – его сжатие.

В процессах механической обработки резьба образуется с помощью металлообрабатывающего инструмента путем удаления или вытеснения части материала заготовки, расположенной между выступами резьбы детали. При этом выделяют следующие процессы обработки резьбы:

- 1) нарезание – формирование резьбовых поверхностей путем деформации и последующего срезания поверхностных слоев материала с образованием стружки;
- 2) накатывание – пластическое деформирование материала заготовки с образованием резьбовых поверхностей без снятия стружки;
- 3) электрофизическая обработка (ЭФО) – расплавление материала заготовки для формирования резьбовых поверхностей;
- 4) электрохимическая обработка (ЭХО) – растворение материала заготовки для формирования резьбовых поверхностей.

Сочетание перечисленных технологических процессов может привести к созданию комбинированных методов обработки. Однако, в основном, технология обработки резьб базируется на процессах нарезания и накатывания.

Особенностью обработки внутренних резьб (рисунок 1.4.1 *а, б*) является наличие габаритных ограничений для инструмента, которые отсутствуют при обработке наружных резьб. Эти ограничения вынуждают использовать менее жесткие инструменты с уменьшенным числом режущих зубьев или накатывающих выступов, что ухудшает условия охлаждения, смазывания и отвода стружки (если она образуется).

В контексте технологии изготовления резьбовых деталей следует выделять три типа производства:

а) специализированное производство – предназначено для изготовления крепежных резьбовых деталей в специализированных метизных цехах, корпусах или на отдельных предприятиях;

б) массовое и крупносерийное производство – для изготовления резьбовых деталей всех типов в цехах основного механосборочного производства;

в) единичное и мелкосерийное производство – для изготовления резьбовых деталей всех типов в экспериментальных, вспомогательных, ремонтных и других цехах.

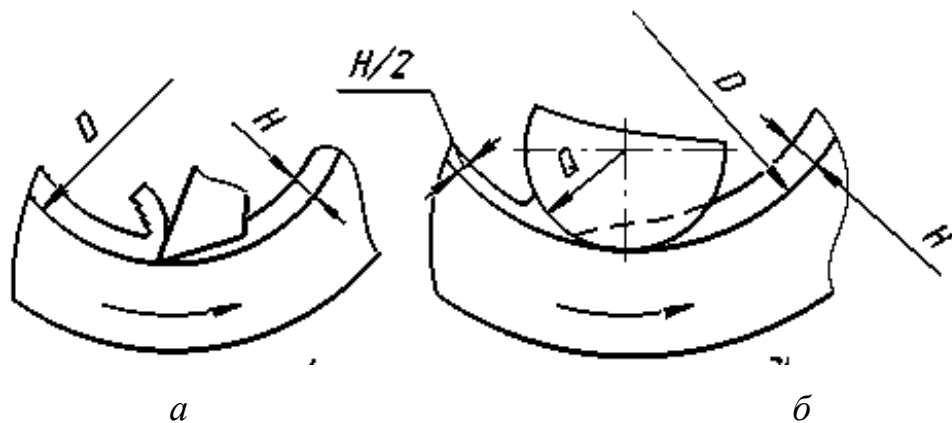


Рисунок 1.4.1 – Схемы физической сущности методов резания и накатывания внутренних резьб глубиной H на поверхности с большим внутренним D диаметром и наружным d диаметром : *а*– нарезание внутренней резьбы клином резьбовой формы; *б* – накатывание внутренней резьбы круглым одновитковым роликом резьбовой формы с радиусом Q

Тип производства в значительной степени определяет приоритетность, последовательность и глубину проработки различных технологических вопросов и оказывает существенное влияние на выбор оптимального метода обработки. Основной задачей специализированного производства является технически обоснованный выбор способа обработки и специального высокопроизводительного резьбообразующего оборудования. В крупносерийном и массовом производстве на первый план выходит выбор оборудования и оснастки, а в единичном производстве – выбор инструмента. Как правило, именно тип производства определяет требования к

производительности, себестоимости и качеству обработки резьб. Следовательно, для каждого типа производства характерен свой оптимальный набор применяемых методов обработки, на который следует ориентироваться при проектировании операций обработки резьб.

Технологическая характеристика существующих методов механической обработки внутренних резьб представлена в таблице 1.4.1.

Таблица 1.4.1 – Характеристика методов обработки внутренних резьб

Метод обработки внутренних резьб	Диаметр, мм	Шаг Р, мм	Максимальная длина, мм	Минимальная величина сбега, мм	Максимальная твердость заготовки, HRC	Степень точности	Максимальная достижимая производит., шт/мин
Нарезание:							
метчиками	0,25...300	0,075...10	300	Р	45	2...7	500
головками	36...300	0,75...8	200	2 Р	45	5...8	10
Точение	10...1000	0,5...100	500	0,5 Р	60	4...8	5
Шлифование	20...400	0,5...100	500	0,5 Р	70	Св.2	5
Фрезерование	20...300	0,5...100	100	0	35	6...8	3
Вихревая обработка	30...350	3...50	300	Р	45	7...9	2
Протягивание	10...150	2...20	200	Р	32	6...7	5
Накатывание:							
метчиками	1...52	0,25...2,5	200	3 Р	24	2...6	50
роликом и роликовыми головками	50...200	0,5...3	200	3 Р	24	4...6	2
планетарное	50...400	0,5...2	100	2 Р	24	4...6	1
ЭФО	1...100	0,35...3	20	0	70	7...9	1
ЭХО	1...100	0,35...2	20	0	70	7...9	1

Данные таблицы 1.4.1 служат отправной точкой для выбора рационального метода обработки резьб, так как включают в себя диаметр, шаг и максимальную длину обработки, позволяя технологу сузить область поиска, ограничиваясь детальным рассмотрением нескольких подходящих методов, соответствующих заданным параметрам резьбы и расположению поверхности. Таблица помогает отсеять заведомо неподходящие методы, тем самым оптимизируя процесс проектирования. Например, если требуется нарезать резьбу МЗ в глухом отверстии из закаленной стали ($HRC > 45$), то из таблицы сразу видно, что методы накатывания (ограничены твердостью HRC 24) и протягивания (ограничены твердостью HRC 32) не подходят. Остается рассматривать методы нарезания (метчиками, точением, шлифованием) и электрофизической или электрохимической обработки. Далее необходимо анализировать другие факторы, такие как требования к точности, шероховатости, производительности и себестоимости, чтобы сделать окончательный выбор. Таким образом, таблица 1.4.1 является ценным инструментом для технолога при проектировании операций резьбообработки, особенно на начальном этапе.

Действительно, при обработке внутренних резьб во всех типах производства наиболее распространенным методом является нарезание резьбы метчиками. В специализированном производстве крепежных деталей преобладает метод нарезания резьб машинными и гаечными метчиками, причем гаечные метчики используются чаще.

При формировании мелкоразмерных внутренних резьб в глухих глубоких отверстиях практически единственным способом обработки является нарезание резьбы метчиком с вращением инструмента и согласованным осевым перемещением – на шаг образуемой резьбы за один оборот метчика [84].

Для повышения стойкости метчика при ручном нарезании резьбы используют технологию дробления стружки. Инструмент, закрепленный в воротке, вращают и ввинчивают в отверстие на 1...2 оборота, затем

реверсируют и вывинчивают на 0,5 оборота (рисунок 1.4.2). Этот цикл повторяют до полного нарезания резьбы в отверстии, после чего реверсивным движением метчик полностью вывинчивают из глухого отверстия.

Среди недостатков вышеописанного ручного способа нарезания резьбы следует выделить низкую производительность, обусловленную необходимостью использования набора метчиков (чернового, среднего и чистового), а также недостаточное качество резьбы, которое может быть вызвано перекосом метчиков в отверстии и необходимостью удаления стружки, скапливающейся в канавках метчика.

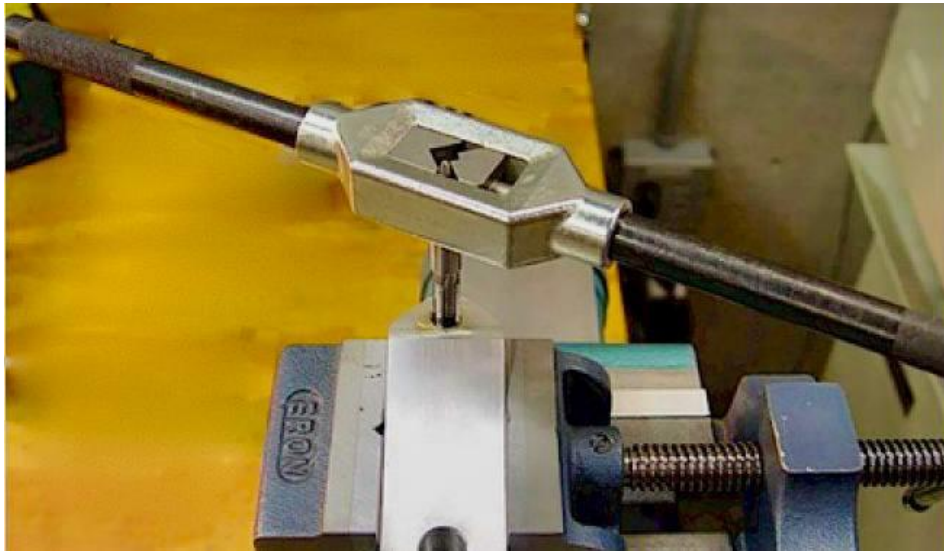


Рисунок 1.4.2 – Ручное нарезание резьбы метчиком в глухом глубоком отверстии

Предпринимались попытки автоматизировать процесс нарезания резьбы в глухих глубоких отверстиях с использованием метчика на резьбонарезном станке (рисунок 1.4.3) (авторское свидетельство SU 1061947А, опубл. 23.12.1983 г.) [3]. В этом автоматизированном процессе метчик, установленный в шпинделе станка с лопастным поворотным гидродвигателем, вращается и ввинчивается в обрабатываемое отверстие. Затем происходит частичное вывинчивание метчика, при этом длина вывинчивания меньше длины ввинчивания. Данный цикл повторяется до полного нарезания резьбы на заданную глубину. Параллельно в зону обработки подается смазочно-

охлаждающая жидкость (СОЖ). Основные элементы станка: шпиндель (1) удерживает метчик; винт (2) и гайка (3) обеспечивают осевую подачу метчика в отверстие; колесо привода (4) передает вращение от гидродвигателя к шпинделю; гидродвигатель (5) и лопасть (6) обеспечивают вращение шпинделя; зубчатое колесо (7), электромагнитные муфты (8, 11), электродвигатели холостого хода (9) и рабочего хода (12), шестерня (10) – используются для управления скоростью вращения и направлением движения шпинделя, обеспечивая цикл ввинчивания и вывинчивания метчика; каналы подвода (13, 14), дроссель (15), распределитель (16) – осуществляют подачу и регулировку подачи СОЖ в зону резания. Данная конструкция позволяет автоматизировать процесс нарезания резьбы с дроблением стружки, что повышает производительность и снижает влияние человеческого фактора. Однако, сложность конструкции может увеличивать стоимость оборудования и требовать квалифицированного обслуживания.

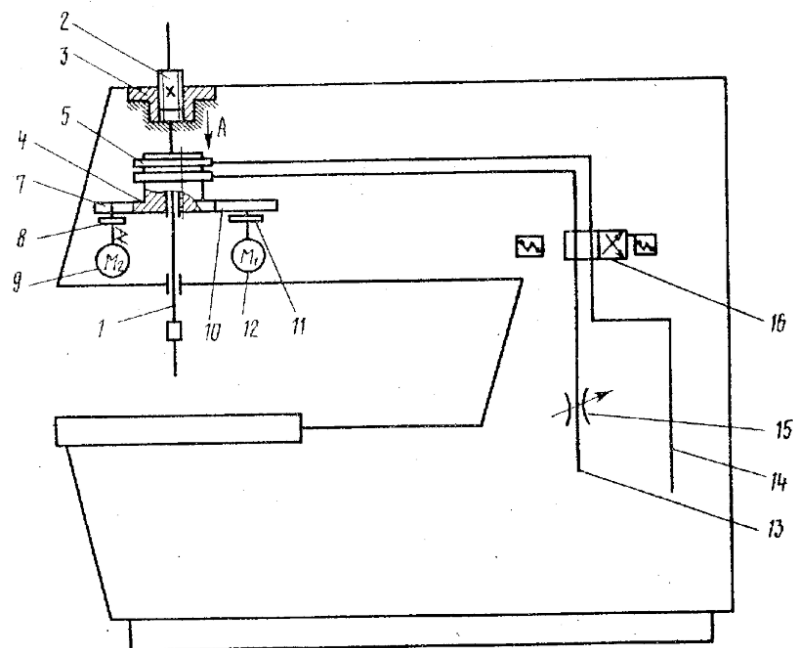


Рисунок 1.4.3 – Резьбонарезной станок (авт. свид, 1061947А SU): 1 – шпиндель; 2 – винт; 3 – гайка; 4 – колесо привода; 5 – гидродвигатель; 6 – лопасть; 7 – зубчатое колесо; 8 – электромагнитная муфта; 9 – электродвигатель холостого хода; 10 – шестерня; 11 – электромагнитная муфта; 12 – электродвигатель рабочего хода; 13, 14 – каналы подвода; 15 – дроссель; 16 – распределитель

Недостатком данного способа является низкое качество резьбы при обработке мелкоразмерных глухих глубоких отверстий. Это обусловлено несколькими факторами: попадание корней стружки в резьбу; накопление стружки в нижней части глухого отверстия и в канавках метчика; защемление и вдавливание срезанной стружки в обрабатываемую поверхность, что приводит к образованию надиров и срывов профиля резьбы; на режущих кромках метчика при этом образуются зоны интенсивного износа и сколы, что приводит к преждевременному выходу их из строя и снижению качества резьбы.

Таким образом, хотя автоматизация процесса и повышает производительность, недостатки, связанные с отводом стружки и износом инструмента, существенно ограничивают область применения данного метода для обработки мелкоразмерных глухих глубоких отверстий, особенно при высоких требованиях к качеству резьбы.

Для реализации описанного выше ступенчатого цикла формообразования мелкоразмерной резьбы, авторами [73] рекомендовано использование режуще-деформирующих метчиков (рисунки 1.4.4 и 1.4.5).

Метчики с интегрированными формообразующими элементами, называемые режуще-деформирующими метчиками (рисунки 1.3.5 и 1.3.6), могут способствовать интенсификации процесса резьбообработки в труднообрабатываемых материалах. Однако, они не в полной мере используют потенциал повышения точности, который может быть достигнут за счет сочетания резания с пластическим деформированием и возможности обратного резания, вытекающего из физической сущности процесса резьбоформирования.

Конструкция такого метчика (рисунок 1.4.4) включает в себя зубья, сформированные путем нарезания на витках основной резьбы $(n+1)$ – заходной правой и $(n-1)$ – заходной левой резьб с шагом, равным шагу основной резьбы метчика. При этом начала заходов правых резьб смещают на

$\frac{360^\circ}{n+1}$, а левых – на $\frac{360^\circ}{n-1}$ относительно захода основной резьбы, где n – количество перьев метчика. Затем на рабочей части метчика выполняется $\frac{n-1}{2}$ стружечных канавок с наибольшей угловой шириной $\omega = \frac{360^\circ}{n}$ и угловым шагом 2ω , образующие в поперечном сечении метчика дополнительно зубья обратного резания.

На рисунке 1.4.4, а изображено поперечное сечение рабочей части метчика, имеющего три рабочих грани, а на рисунке 1.4.5, б – пять граней.

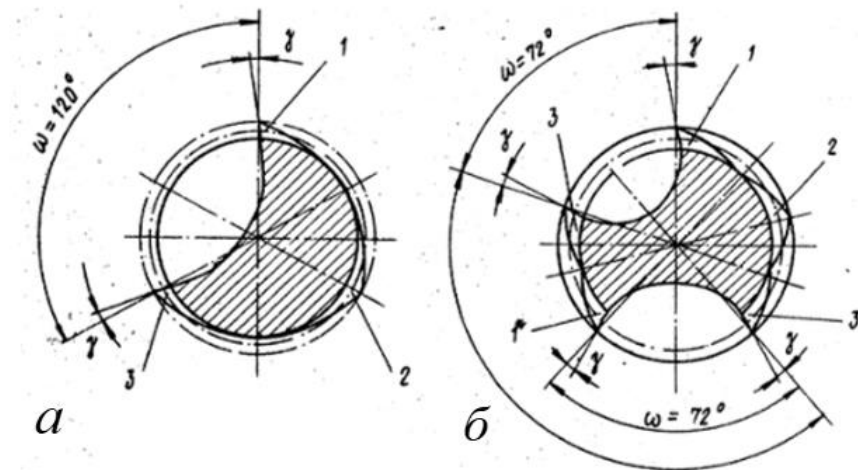


Рисунок 1.4.4 – Поперечное сечение рабочей части режуще-деформирующего метчика [64]: а – с тремя рабочими гранями, б – с пятью рабочими гранями, где: 1 – режущие зубья, 2 – деформирующие зубья, 3 – зубья обратного резания

Другая из представленных авторами [5] конструкций режуще-деформирующего метчика (рисунок 1.4.5), рекомендованного для мелкоразмерного резбонарезания в глубоких отверстиях, состоит из заборной 1 и калибрующей 2 частей, а также хвостовика 3. Перья заборной части включают режущие зубья 4 и зубья пластически деформирующие 5. Каждый зуб его заборной части осуществляет черновое формообразование резьбы, а расположенный последовательно на одной винтовой линии, пластически

деформирующий зуб осуществляет пластическое деформирование профиля. Последующие зубья обрабатывают оставшуюся часть профиля, далее зубья калибрующей части осуществляют окончательное формообразование резьбы методом пластической деформации и выполняют роль направляющих элементов. Особенностью данной конструкции является сочетание резания и пластического деформирования в пределах одного пера (одного витка резьбы метчика). На заборной части выполнены канавки, которые смещены относительно вершин рабочих выступов в сторону передней поверхности режущих зубьев. Вероятно, это сделано для улучшения отвода стружки и предотвращения ее защемления между зубом и обрабатываемой поверхностью.

На рисунке 1.4.5 представлена конструкция режуще-деформирующего метчика, включающая в себя: *а* – общий вид, где показаны его заборная часть 1, калибрующая часть 2 и хвостовик 3; *б* – перья заборной части, где изображены витки заборной части с режущими зубьями 4 и пластически деформирующими зубьями 5; *в, г* – сечения А-А и Б-Б общего вида; *д* – развертка поверхности рабочей части метчика, позволяющая увидеть взаимное расположение режущих и деформирующих зубьев, а также канавок для отвода стружки; *е* – схема формообразования резьбового профиля, поясняющая, как режущие зубья снимают основную часть материала, а затем деформирующие зубья придают профилю окончательную форму и сглаживают поверхность.

Хотя режуще-деформирующие метчики, описанные выше, позволяют повысить точность резьб и упростить их изготовление, при обработке резьбы в глухих глубоких отверстиях они демонстрируют пониженную технологическую и эксплуатационную надежность. Это связано со сложностью подачи СОЖ в зону обработки, что затрудняет охлаждение и смазку инструмента и повышенным износом зубьев из-за высоких нагрузок и затрудненного отвода стружки. В конечном итоге, эти факторы приводят к снижению качества и точности образуемой резьбы.

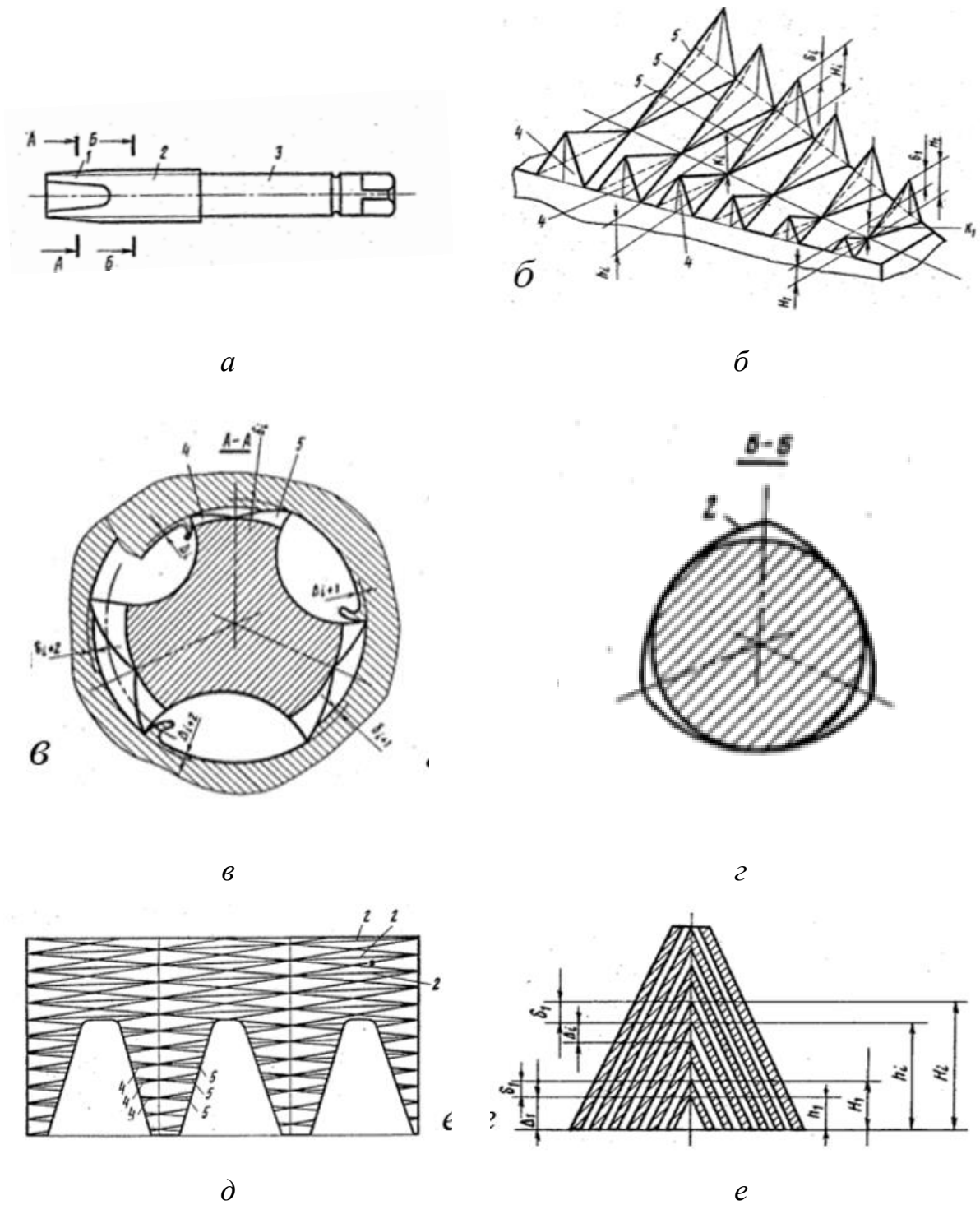


Рисунок 1.4.5 – Режуще-деформирующий метчик [65]: *а* – общий вид; *б* – перья заборной части; *в*, *г* – сечения А-А и Б-Б общего вида; *д* – развертка рабочей поверхности; *е* – схема формообразования резьбового профиля

Таким образом, анализ существующих методов мелкоразмерной резьбообработки показывает, что каждый из них имеет как достоинства, так и недостатки. Это подчеркивает актуальность задачи совершенствования

формообразования внутренних резьб малых диаметров метчиком в глухих глубоких отверстиях. Для решения этой задачи целесообразно проводить анализ и поиск новых технических решений, направленных на рационализацию способов реализации процесса резбонарезания и совершенствование конструкций технологического оборудования, включая инструмент, также важно учитывать особенности обработки глухих глубоких отверстий, такие как затрудненный отвод стружки и подача СОЖ, а также стремиться к повышению стойкости инструмента и снижению износа.

1.5 Анализ методов оценки надежности технологической системы станочного оборудования и резбонарезного инструмента

Методика оценки надежности, основанная на принципах системного подхода, является важным критерием для оценки правильности решений, принимаемых при совершенствовании процессов механической обработки и оборудования. Надежность и долговечность напрямую влияют на эффективность использования технологического оборудования и качество обрабатываемой поверхности.

Важно отметить вклад ученых, которые внесли значительный вклад в развитие теории надежности. Упомянутые авторы (Б.В. Гнеденко [21], М.С. Беляев [11], Д.Н. Решетов [101], А.С. Проников [94, 95], Г.Д. Григорян [30, 31], В.Э. Пуш [96, 97], И.В. Дунин-Барковский [39], В.А. Ратмиров [99], К. Капур и Л. Ламберсон [55] и ряд иных [38, 68, 85, 89, 104, 130, 131]) представляют собой авторитетных исследователей, чьи работы заложили основы современных методов оценки и обеспечения надежности в различных областях техники, включая машиностроение и металлообработку. Ссылки на их труды позволяют более глубоко изучить теоретические и практические аспекты этой области.

Подчеркивается важная взаимосвязь между надежностью, производительностью и экономической эффективностью технологической системы. Для анализа этой взаимосвязи отказы классифицируются по

определенным группам, что позволяет выявить закономерности, характерные для каждого типа отказа. Для количественной оценки влияния надежности на производительность обычно используются коэффициенты готовности или коэффициент технического использования. Эти коэффициенты, безусловно, представляют практический интерес, поскольку позволяют оценить эффективность использования оборудования. Однако, справедливо отмечается, что указанные оценки не учитывают всех аспектов, связанных с отказами и восстановлением подсистем и элементов технологической системы. Более детальный анализ должен учитывать сложность структуры системы, взаимосвязи между ее элементами и влияние отказов на различные параметры процесса обработки.

Подход В.Я. Катковника [56] к разработке модели производительности технологического оборудования представляет собой важный шаг к более детальному учету факторов надежности. Предположение о пуассоновском законе для внезапных отказов и экспоненциальном законе для времени восстановления является распространенным упрощением, которое позволяет использовать результаты математической теории массового обслуживания для анализа системы. Установление вероятностей является ключевым моментом, так как позволяет количественно оценить влияние отказов на производительность. Сделанное заключение о том, что такой подход может быть использован на предварительном этапе структурно-параметрической оптимизации резбонарезного оборудования и инструмента, представляется обоснованным. Он позволяет оценить влияние различных параметров системы (например, интенсивность отказов, время восстановления) на ее производительность и определить оптимальную структуру и параметры оборудования и инструмента.

В теории массового обслуживания (ТМО) подтверждается утверждение, что ординарный поток с непрерывной функцией $H(t)$, характеризующийся отсутствием последействия, представляет собой простейший нестационарный поток [101]. Это важное свойство потока событий (в данном случае, отказов),

которое позволяет упростить анализ и разработку моделей. Следовательно, вероятность P появления n отказов на заданном участке времени (t_1, t_2) может быть выражена определенной формулой (1.5.1). В данном контексте подразумевается, что эта формула является следствием свойств простейшего нестационарного потока.

$$P_n(t_1, t_2) = \frac{[H(t_2) - H(t_1)]^n}{n!} \cdot e^{-[H(t_2) - H(t_1)]} \quad (1.5.1)$$

Утверждается, что для любой системы неперекрывающихся интервалов события, заключающиеся в появлении заданного числа отказов на каждом интервале, являются независимыми. Это важное следствие свойств простейшего нестационарного потока. Таким образом, делается вывод, что при достаточно общих условиях поток отказов технологической системы станка будет, по крайней мере, приближенно, простейшим нестационарным потоком. Из этого следует, что число отказов на каждом интервале времени распределено по закону Пуассона. Такой поток называется пуассоновским потоком с переменным параметром. Этим переменным параметром является интенсивность отказов $\lambda(t)$. Тогда упомянутую ранее формулу (1.5.1) можно записать в виде, учитывающем, что параметр $\lambda(t)$ зависит от времени:

$$P_n(t_1, t_2) = \frac{\left[\int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) dt \right]^n}{n!} \cdot e^{-\int_{t_1}^{t_2} \lambda(t) dt} \quad (1.5.2)$$

В случае, если функция интенсивности отказов $\lambda(t)$ на рассматриваемом участке времени $(t, t + \tau)$ является приблизительно постоянной ($\lambda(t) \approx \lambda_0$), то это значительно упрощает анализ. В этом случае вероятность появления заданного

числа отказов будет описываться стандартным распределением Пуассона с постоянным параметром λ_0 .

Если на участке $t+\tau$ функция $\lambda(t)$ приближенно линейна, то хорошее соответствие для этих вероятностей дает равенство:

$$P_n(t, t+\tau) = \frac{\left[\lambda \left(t + \frac{\tau}{2} \right) \tau \right]^n}{n!} \cdot e^{-\lambda \left(t + \frac{\tau}{2} \right) \tau}. \quad (1.5.3)$$

Если же функция $\lambda(t)$ на этом участке приближенно постоянна, $\lambda(t) \approx \lambda$, то

$$P_n(t, t+\tau) = \frac{(\lambda \tau)^n}{n!} \cdot e^{-\lambda \tau}. \quad (1.5.4)$$

Так как на участках между соседними отказами $\lambda(t)$ почти не меняется, то среднее время до первого отказа элемента выражается приближенной формулой $\bar{T} \approx 1/\lambda(t)$.

Как правило, работа системы станка продолжается столь долго, что все подсистемы могут отказать по несколько раз. При этих условиях процессы восстановления становятся стационарными, и, значит, поток отказов системы также устанавливается. Так как плотности восстановления для каждого элемента стремятся к пределам $\lim_{t \rightarrow \infty} \mu_k(t) = 1/\bar{T}_k$, то интенсивность отказов

системы имеет предел $\lim_{t \rightarrow \infty} \lambda(t) = \lambda_0 = \sum_{k=1}^m 1/\bar{T}_k$, где m – число элементов. При

этом поток системы становится пуассоновским потоком с постоянным параметром, т.е. простейшим потоком. Для этого потока вероятность появления n отказов на участке времени длительности τ не зависит от положения этого участка и выражается формулой

$$P_n(\tau) = \frac{(\lambda_0 \tau)^n}{n!} \cdot e^{-\lambda_0 \tau} \quad (1.5.5)$$

В частности, вероятность безотказной работы системы в течение времени τ равна $P_0(\tau) = e^{-\lambda_0 \tau}$ и, значит, среднее время безотказной работы равно $\bar{T} = 1/\lambda_0$. Это важный показатель надежности, который характеризует средний интервал времени между отказами. Надежность каждой подсистемы в технологической системе станка подчиняется экспоненциальному закону:

$$F_k(t) = 1 - e^{-\lambda_k t}. \quad (1.5.6)$$

Это означает, что вероятность безотказной работы подсистемы уменьшается экспоненциально со временем.

Утверждается, что если процесс восстановления для каждого элемента станочной системы является простейшим потоком, то поток восстановления системы в целом, будучи суммой простейших потоков, также будет простейшим потоком. Это означает, что процессы восстановления будут характеризоваться отсутствием последействия и постоянной интенсивностью.

Исследования отказов осевого инструмента А.А. Грудова [34, 37] и других авторов [6, 49, 74, 129], показывают, что значительная доля отказов технологического оборудования связана с поломками осевого режущего инструмента (50-70%). Инструмент является наиболее уязвимым элементом, за которым следуют механические узлы, электро- и гидрооборудование. В качестве рекомендации по повышению надёжности следует произвести увеличение стойкости и прочности инструмента, более тщательный выбор конструкции и режимов эксплуатации.

Ограниченность рекомендаций: Существующие рекомендации по повышению надежности часто эффективны только для узких областей

применения, что затрудняет их использование в новых условиях, таких как мелкоразмерное резьбонарезание в глухих глубоких отверстиях. При совершенствовании процессов и конструкций инструмента для мелкоразмерного резьбонарезания необходимо учитывать специфические особенности этой области, такие как широкий диапазон труднообрабатываемых материалов, разнообразие типов деталей и высокие требования к эксплуатационной надежности.

Использование декомпозиции технологического оборудования на подсистемы и представление информации в виде графов состояний с параметрами потоков отказов и восстановления позволяет оценить надежность и производительность, а также минимизировать затраты на создание и использование оборудования.

Методы оценки надежности, разработанные Ю.К. Новоселовым и А.О. Харченко [116], могут быть использованы в качестве основы при структурной и параметрической оптимизации технологической системы станка и инструментов для мелкоразмерного резьбонарезания в глухих глубоких отверстиях в труднообрабатываемых материалах.

Эксплуатационная надежность оказывает существенное влияние на производительность и экономическую эффективность системы. Здесь необходимо подчеркнуть необходимость комплексного подхода к обеспечению надежности технологической системы резьбонарезания, учитывающего специфические особенности мелкоразмерной обработки в труднодоступных местах и использующего современные методы анализа и оптимизации.

Для оценки производительности и влияния на неё надёжности необходимо вводить коэффициенты готовности и технического использования. Эти коэффициенты полезны для оценки производительности, но имеют ограничения, не учитывая переналадку и параметрические отказы.

Подход через параметрические отказы и синтез системы целесообразно использовать при синтезе технологической системы для резьбообработки на

стадии оценки интенсивности параметрических отказов технологических элементов посредством выбора основных видов исходных погрешностей. Для процессов нарезания резьб необходимо при этом определить основные параметры точности обработки, разработать методику их оценки.

Существующие методики проектирования и синтеза оборудования, как правило, не учитывают стохастические процессы (потоки отказов, восстановления, переналадки), что не позволяет объективно оценить эффективность вариантов.

Модели В.Я. Катковника [56] упрощают анализ, используя пуассоновские законы и экспоненциальное распределение времени восстановления. Подходят для предварительного этапа синтеза, но не учитывают неоднородность элементов системы, для определения установившихся при этом вероятностей используют результаты теории массового обслуживания. Данный подход применим только на предварительном этапе, так как ранее было принято ранее большое количество допущений, что недопустимо для дальнейшей оценки эффективности.

В основе аналитической оценки и модели точности лежит моделирование изменения точности обработки во времени [31, 69]. Работы А.С. Проникова [94, 95] внесли вклад в понимание формирования погрешностей на многооперационных станках. Такой подход полезен для уменьшения влияния погрешностей на надежность и воздействия на надежность не только организационными методами, но и конструкторскими.

В.В. Матвеев [70] предложил гипотезу о “переносе” размера инструмента при резании метчиком, что позволяет прогнозировать точность резьбовых отверстий при обработке различных материалов и разрабатывать практические рекомендации. Его подход подчеркивает важность оптимальной конструкции метчиков, метчикодержателей, несущих шпинделей и самих станков. Методы определения точностных параметров резьбы могут быть использованы для определения характеристик технологической надежности элементов технологических систем для резьбообработки.

А.А. Грудов и другие: Исследования показали, что 50-70% режущих метчиков размерами М2-М6 выходят из строя из-за поломки. Ранжирование отказов выявляет, что инструмент является наиболее уязвимым элементом. Из этого следует, что для увеличения стойкости и прочности инструмента, необходим более тщательный выбор конструкции и режимов эксплуатации. Существует множество конструкций метчиков и схем резания [7, 42, 71, 74, 125, 128].

Большую роль сыграла разработка корригированных метчиков [42, 43]. Они представляют собой значительный прогресс в совершенствовании конструкций метчиков, повышая производительность и стойкость при нарезании резьб в труднообрабатываемых материалах. Они имеют такие ограничения как сложность изготовления и непригодность для обработки глухих отверстий.

Метчики с шахматным расположением зубьев: А.Т. Шифрин [125, 126] утверждал, что такая конструкция уменьшает площадь контакта, улучшает размещение стружки и повышает стойкость метчика.

Проводились исследования по накатыванию резьбы бесстружечными, пластическими деформирующими метчиками [ПДМ]. Накатывание резьбы бесстружечными метчиками (ПДМ), в отличие от резания, формируется выдавливанием металла, что устраняет проблему стружки, особенно при обработке глухих резьб. Исследования Э.В. Рыжова, О.С. Андрейчикова, А.Е. Стешкова [103], а также стандарты, основанные на работах В.М. Меньшакова, Г.П. Урлапова, В.С. Середы [74, 112], способствовали популяризации этого метода.

Мнения о надежности ПДМ расходятся. Некоторые не видят преимуществ по стойкости, другие отмечают увеличение в 10-20 раз. В.Г. Якухин [129] установил, что накатывание эффективнее для резьб малых размеров (М3...М4), где достигается 10-кратное повышение стойкости. Для больших диаметров (М10...М12) преимущества по стойкости незначительны.

Следовательно, рекомендации исследователей в значительной степени ориентированы на узкие области, что затрудняет их применение в новых условиях, присущих мелкоразмерному резьбонарезанию в глухих глубоких отверстиях. Учитывая эти особенности, необходимо с должным вниманием подходить к разработке методов и инструментов для резьбообработки. Концепцию состояния системы ввёл Н.Г. Наянзин [86]. Он вводит понятие изменения технологических возможностей в пределах технологического потенциала системы через изменение морфологической и функциональной организации. Подчеркивается важность параметрической гибкости, обеспечиваемой программно-управляемыми параметрами. Отмечается, что гибкость как организованная форма деятельности систем является многоплановой, и существующие подходы не дают ее исчерпывающей характеристики, а также не выделяют ее связь с надежностью и эффективностью. Таким образом, результаты проведенных исследований указывают на то, что гибкость, как организованная форма деятельности систем, обладает многогранным характером. Каждый из обозначенных подходов не предоставляет полного описания данного показателя. Также не была установлена его связь с параметрами надежности оборудования и эффективностью различных рассматриваемых вариантов.

Существует необходимость в разработке новых методик проектирования и синтеза технологических систем для мелкоразмерного резьбонарезания в глухих глубоких отверстиях, которые учитывают специфические особенности процесса, параметры надежности и гибкости оборудования и стохастические процессы, связанные с отказами, восстановлением и переналадкой.

Изученные подходы к оценке надежности и гибкости оборудования могут стать основой для разрабатываемой методики синтеза технологических систем, предназначенных для резьбообработки в глухих глубоких отверстиях.

Широкое распространение и значительная трудоемкость обработки внутренних резьб малых диаметров, а также низкая производительность труда

и высокий процент брака требуют усовершенствования данного процесса, особенно в случае глухих глубоких отверстий. Специальное оборудование, разработанное для этих задач, имеет свои недостатки, связанные со сложностью переналадки и низкой надежностью. При его разработке не были учтены особенности формирования резьбы малых диаметров в глубоких глухих отверстиях, выполненных из труднообрабатываемых материалов.

Данный обзор подчеркивает важность дальнейших исследований в области повышения надежности резбонарезного инструмента, особенно для сложных условий обработки, таких как мелкоразмерное резбонарезание в глухих глубоких отверстиях. Также важно учитывать ограничения существующих решений, таких как корригированные метчики, при разработке новых подходов.

1.6 Выводы. Основные задачи исследования

1. Научные исследования, посвященные резбообразованию в глухих глубоких отверстиях, нацелены на совершенствование данного процесса, однако, в настоящее время отсутствуют единые, научно обоснованные рекомендации по формированию внутренних резьб малых диаметров, что часто не позволяет обеспечить требуемые параметры качества резьб в производственных условиях. В связи с этим возникает необходимость в проведении комплексного, систематизированного исследования влияния процессов формирования резьб в глухих глубоких отверстиях метчиками на качество внутренних резьб и производительность обработки.

2. Анализ конструкций метчиков показывает, что задача формирования внутренних резьб малых диаметров с требуемой точностью в глухих глубоких отверстиях до сих пор остается актуальной. Для решения практических задач, связанных с повышением точности и интенсификацией процесса, необходимо проанализировать причины, снижающие точность и ухудшающие стабильность, на основе выявления закономерностей резбообразования в

рамках технологической системы и с учетом технологических и производственных условий. Таким образом, существует необходимость в проведении комплексного, систематизированного исследования влияния процессов формирования мелкоразмерных резьб метчиками в глубоких глухих отверстиях на качество и производительность обработки.

3. Существующие исследования резьбообработки имеют свои недостатки. Несмотря на большое количество разработанных моделей, все они имеют ограниченную применимость, обусловленную специфическими условиями моделирования, и не позволяют в полной мере описать особенности процесса внутренней мелкоразмерной резьбообработки в глухих глубоких отверстиях.

4. Таким образом, анализ существующих методов мелкоразмерной резьбообработки показывает, что каждый из них имеет как достоинства, так и недостатки. Это подчеркивает актуальность задачи совершенствования формообразования внутренних резьб малых диаметров метчиком в глухих глубоких отверстиях. Анализ подчеркивает распространенность, высокую трудоемкость и низкую производительность обработки внутренних резьб малых диаметров, а также высокий процент брака. Существующее оборудование имеет недостатки из-за сложности переналадки и низкой надежности, и при его проектировании не учитываются особенности формообразования резьб малых диаметров в глухих глубоких отверстиях в труднообрабатываемых материалах. Для решения этой задачи целесообразно проводить анализ и поиск новых технических решений, направленных на рационализацию способов реализации процесса резбонарезания и совершенствование конструкций технологического оборудования, включая инструмент, также важно учитывать особенности обработки глухих глубоких отверстий, такие как затрудненный отвод стружки и подача СОЖ, а также стремиться к повышению стойкости инструмента и снижению износа.

5. Широкое распространение и значительная трудоемкость обработки внутренних резьб малых диаметров, а также низкая производительность труда

и высокий процент брака требуют усовершенствования данного процесса, особенно в случае глухих глубоких отверстий. Специальное оборудование, разработанное для этих задач, имеет свои недостатки, связанные со сложностью переналадки и низкой надежностью. При его разработке не были учтены особенности формирования резьбы малых диаметров в глухих глубоких отверстиях, выполненных из труднообрабатываемых материалов. Значимую важность имеет проведение дальнейших исследований в области повышения надежности резьбонарезного инструмента, особенно для сложных условий обработки, таких как мелкоразмерное резьбонарезание в глухих глубоких отверстиях, которые учитывают специфические особенности процесса, параметры надежности и гибкости оборудования и стохастические процессы, связанные с отказами, восстановлением и переналадкой, так как существующие методы оценки надежности технологических систем имеют свои ограничения. Также важно учитывать ограничения существующих решений, таких как корригированные метчики, при разработке новых подходов.

Основные задачи исследования

1. Учитывая влияние подсистем на процесс мелкоразмерной резьбообработки в глухих глубоких отверстиях провести анализ моделирования процесса мелкоразмерного резьбообразования в глухих глубоких отверстиях и разработать алгоритм обеспечения точности данной обработки.
2. Произвести оценку надежности устройств при получении мелкоразмерного резьбообразования в глухих глубоких отверстиях на основе марковских и полумарковских систем, выявить наиболее уязвимые элементы.
3. На основе разработанного цикла обработки экспериментально исследовать процесс мелкоразмерного резьбообразования в глухих глубоких отверстиях.

4. Осуществить оценку полученных результатов и произвести внедрение технических решений на производство, оценить перспективы данных решений.

ГЛАВА 2

АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕЛКОРАЗМЕРНОГО РЕЗЬБООБРАЗОВАНИЯ МЕТЧИКАМИ В ГЛУХИХ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЯХ

2.1 Теоретические предпосылки, гипотезы и принятые допущения

Широкое применение мелкоразмерных резьб М2...М6 в машино- и приборостроении требует решения задачи повышения их точности при обработке глухих глубоких отверстий.

Так как процесс получения мелкоразмерных резьб в глухих глубоких отверстиях (МРвГГО) является сложным многокомпонентным объектом, на который оказывают воздействие большое количество изменяющихся факторов, необходимо его рассматривать на основе системного подхода [88, 117].

На рисунке 2.1.1 представлена общая модель формирования технологической системы для мелкоразмерной резьбообработки в глухих глубоких отверстиях.

На первом этапе происходит формирование цели научного исследования, на втором – создание образа конечного действия, на третьем этапе проверяется достижение конечного состояния, соответствующее его образу, при положительном результате происходит переход на четвертый этап – обновление конечного состояния, а при отрицательном – на пятый этап, которому соответствует выбор образа действия, являющийся входом для шестого этапа в сам процесс обеспечения точности МРвГГО. На выходе достигнутое состояние, из которого происходит переход на восьмой – оценка достигнутого состояния и дальнейший переход на третий этап для сопоставления с целью научного исследования.

Алгоритм обеспечения эффективности и точности мелкоразмерной резьбообработки в глухих глубоких отверстиях представлен на рисунке 2.1.2. Повышение точности МРвГГО может быть достигнуто при условии выполнения следующих этапов [18]:

1. Произвести анализ условий обеспечения точности МРвГГО.
2. Разработать структурную модель процесса получения МРвГГО.
3. Определить приоритетные подсистемы в воздействиях на определение точности МРвГГО.

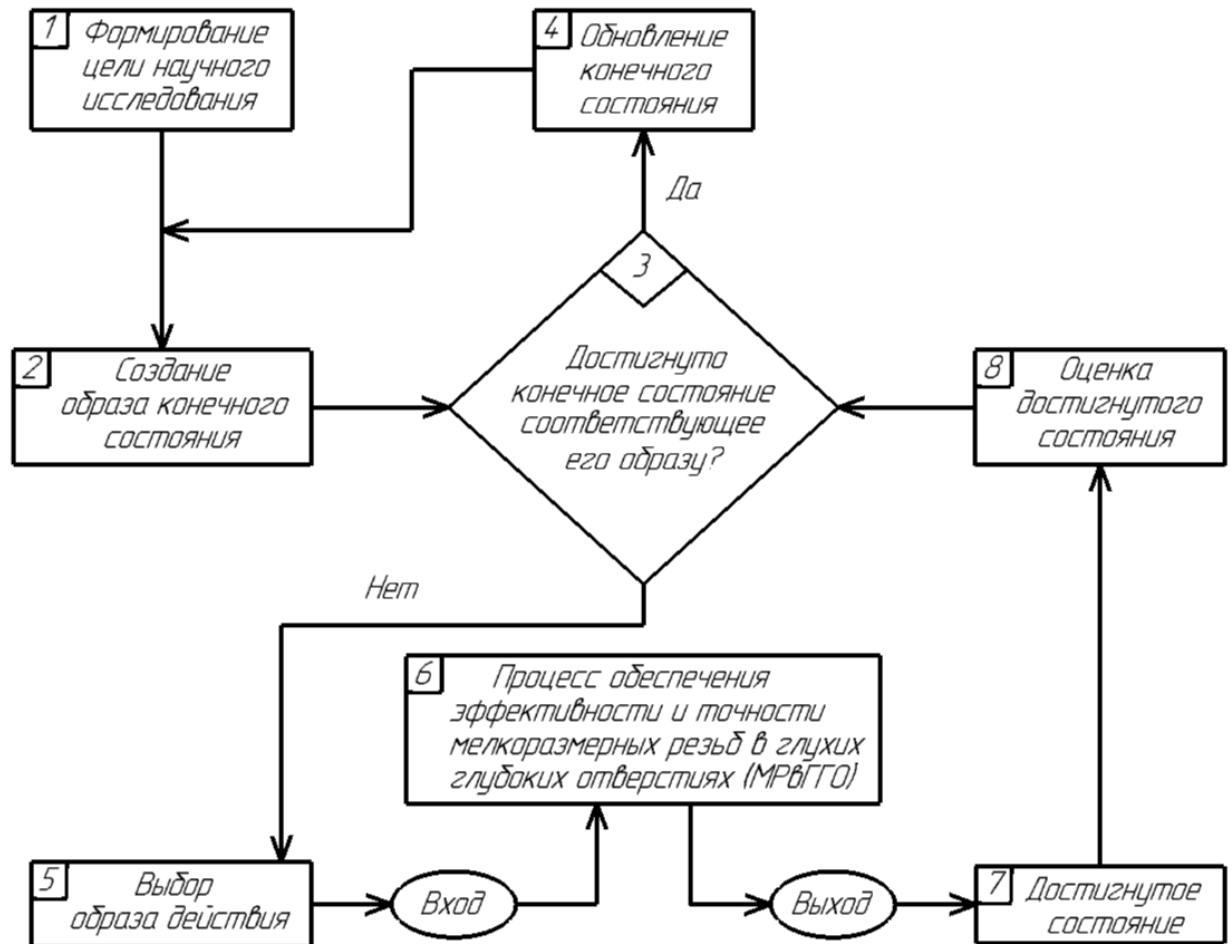


Рисунок 2.1.1 – Общая модель формирования технологической системы для мелкогабаритной резьбообработки в глухих глубоких отверстиях

4. Провести морфологический анализ приоритетных подсистем в воздействиях на точность МРвГГО.
5. Произвести оценку надёжности рациональных вариантов устройств для получения МРвГГО.
6. Провести структурно–параметрическую оптимизацию устройств МРвГГО, включающую в себя следующие этапы: выявление наименее надёжных подсистем и элементов подсистем, выявление наименее надёжных

элементов, определение структуры элементов, определение оптимальности структуры, при отрицательном результате происходит переход на этап оптимизации структуры и далее происходит возврат на этап выявления наименее надёжных элементов, если результат положительный, то происходит переход на седьмой этап.

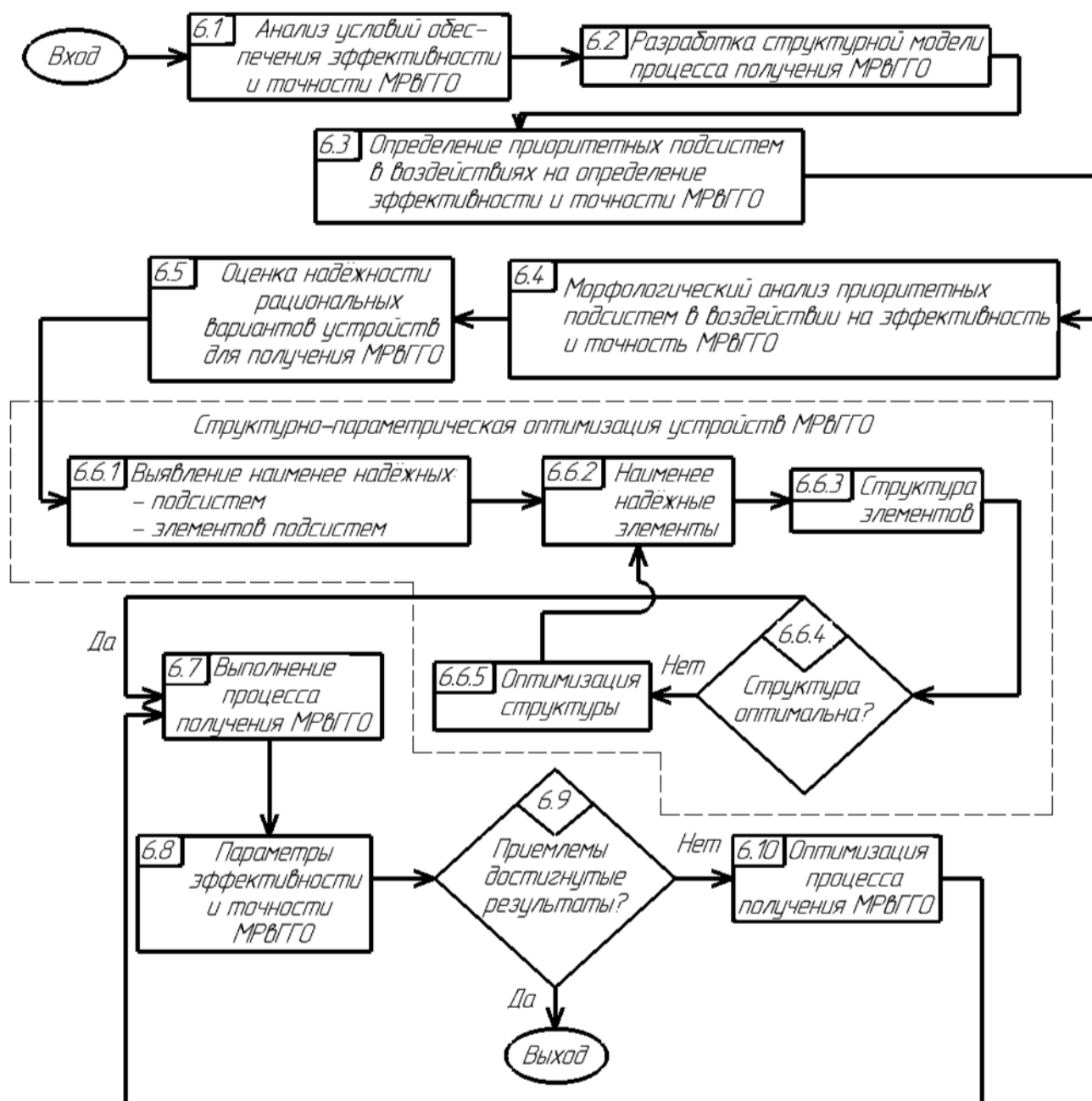


Рисунок 2.1.2 – Алгоритм обеспечения эффективности и точности мелкоразмерной резбобработки в глухих глубоких отверстиях

7. Выполнить процесс получения МРвГГО.
8. Определить параметры точности и эффективности МРвГГО.
9. Оценить приемлемость достигнутых результатов (при положительном результате заканчивают процесс анализа, а при отрицательном происходит возврат на седьмой этап).

2.2 Анализ структуры процесса мелкоразмерной резьбообработки в глухих глубоких отверстиях

Структурная схема процесса мелкоразмерной резьбообработки в глухих глубоких отверстиях включает в себя отдельные элементы, взаимодействующие между собой (рис. 2.2.1). Это – инструмент, заготовка, приспособление, станок, управляющие воздействия и внешняя среда, что можно представить с помощью выражения (2.2.1):

$$Z_{\text{ex}}(\tau) = Z_c(\tau) + Z_y(\tau) + Z_n(\tau) + Z_z(\tau) + Z_{cp}(\tau) + Z_u(\tau) \quad (2.2.1)$$

где $Z_i(\tau)$ – вектор параметров состояния соответствующей подсистемы.

Описать состояние процесса формирования МРвГГО можно с помощью уравнений, которые описываются поведением подсистем:

$$\begin{cases} Z_c(\tau) = \Phi_c(X_{c1}(\tau), X_{c2}(\tau), X_{c3}(\tau), X_{c4}(\tau), X_{c5}(\tau)) \\ Z_n(\tau) = \Phi_n(X_{n1}(\tau), X_{n2}(\tau), X_{n3}(\tau), X_{n4}(\tau)) \\ Z_z(\tau) = \Phi_z(X_{z1}(\tau), X_{z2}(\tau), X_{z3}(\tau), X_{z4}(\tau), X_{z5}(\tau), X_{z6}(\tau), X_{z7}(\tau)) \\ Z_u(\tau) = \Phi_u(X_{u1}(\tau), X_{u2}(\tau), X_{u3}(\tau), X_{u4}(\tau), X_{u5}(\tau), X_{u6}(\tau), X_{u7}(\tau), \\ X_{u8}(\tau), X_{u9}(\tau), X_{u10}(\tau), X_{u11}(\tau), X_{u12}(\tau), X_{u13}(\tau)) \\ Z_{cp}(\tau) = \Phi_{cp}(X_{cp}(\tau)) \\ Z_y(\tau) = \Phi_y(X_y(\tau)) \end{cases} \quad (2.2.2)$$

$$Y(\tau) = F[Z_c(\tau), Z_n(\tau), Z_z(\tau), Z_u(\tau), Z_{cp}(\tau), Z_y(\tau)] \quad (2.2.3)$$

где Φ_i – оператор, отображающий множество входных переменных и параметров исходного состояния соответствующей подсистемы на множество переменных и параметров состояния подсистем в момент времени τ , F – оператор, отображающий множество значений входных переменных и параметров состояния на множество выходных переменных в момент времени τ . $X_{ci}(\tau)$ – векторы входных переменных станка (конструкция и размеры, способ обработки, технологическая и эксплуатационная надёжность, режимы обработки, система управления), $X_{mi}(\tau)$ – векторы входных переменных приспособления (конструкция и размеры, способ обработки, технологическая и эксплуатационная надёжность, способ крепления инструмента в приспособлении), $X_{zi}(\tau)$ – векторы входных переменных заготовки (материал заготовки, геометрические параметры отверстия, габариты, точность подготовленного отверстия, шероховатость подготовленного отверстия, стружкоотделение, режимы обработки), $X_{ui}(\tau)$ – векторы входных переменных инструмента (материал инструмента, конструкция и размеры, способ обработки, режимы обработки, СОЖ, износ, стойкость, точность обработки, крутящий момент, силы резания, изгиб, температура резания, шероховатость поверхности), $X_{cp}(\tau)$ – вектор входной переменной внешней среды, $X_y(\tau)$ – вектор входной переменной управляющего воздействия, $Z_i(\tau)$ – вектор параметров состояния соответствующей подсистемы.

На поведение подсистем также оказывают влияние значения переменных в предыдущие моменты времени $\tau - \Delta\tau$, что можно представить в виде соотношения, характерного для непрерывных динамических систем:

$$\begin{cases} Z(\tau) = F[Z(\tau - \Delta\tau), X_N(\tau)] = F[Z(\tau - \Delta\tau), x_N(\tau), w_N(\tau), u_N(\tau)] \\ Y(\tau) = \Phi[Z(\tau), X_N(\tau)] = \Phi[Z(\tau), x_N(\tau), w_N(\tau), u_N(\tau)] \end{cases} \quad (2.1.4)$$

где $Z(\tau)$ – вектор параметров состояния соответствующей подсистемы, $Y(\tau)$ – вектор выходных параметров, F – закон отображения состояния, Φ – закон отображения параметров выхода, N – номер производной, $w_N(\tau)$ – вектор возмущающих воздействий; $u_N(\tau)$ – вектор управляющих воздействий; $x_N(\tau)$ – вектор входных параметров.

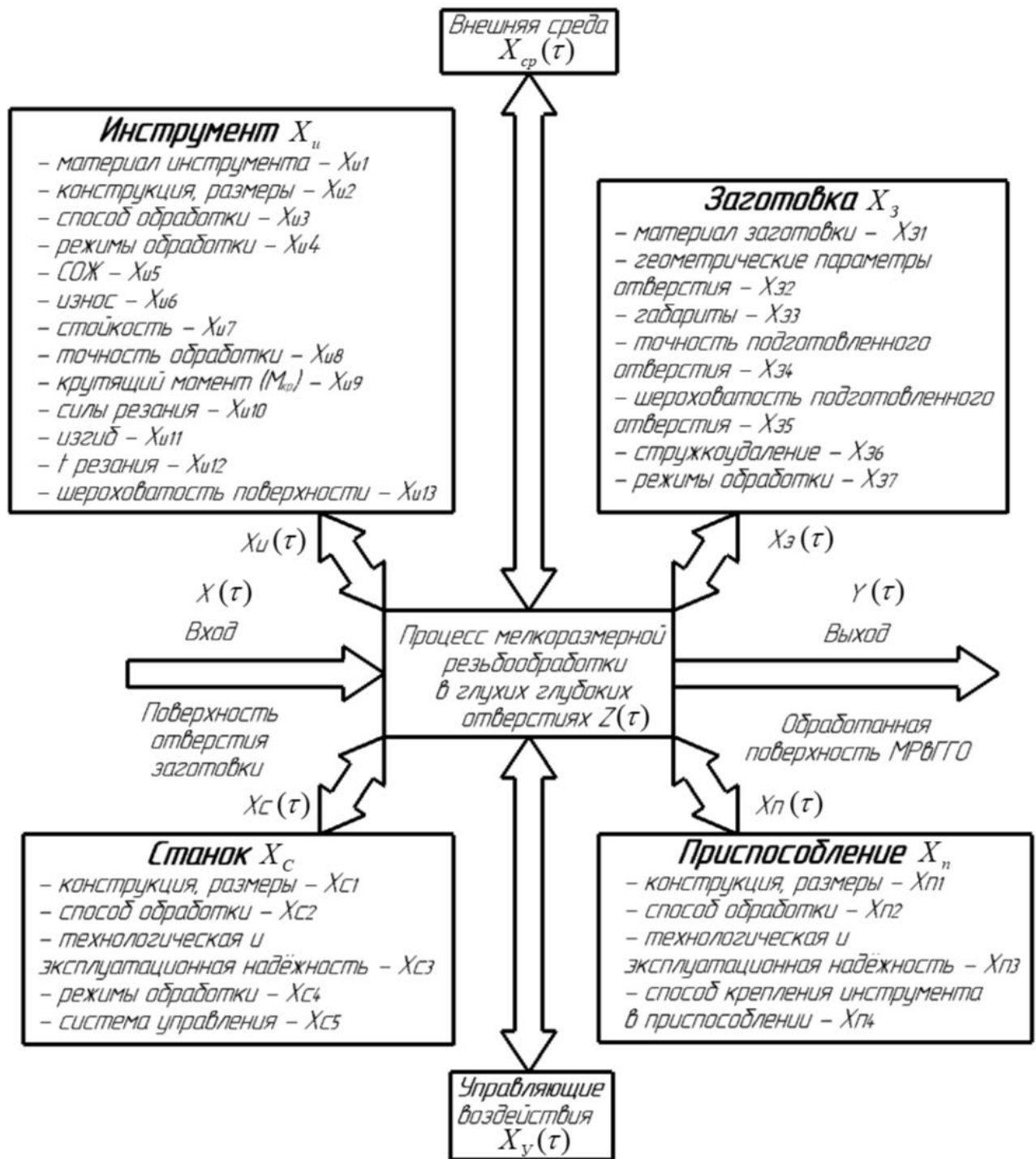


Рисунок 2.2.1 – Структурная схема процесса мелкоразмерной резьбообработки в глухих глубоких отверстиях

Учитывая, что параметры процесса резьбообработки изменяются циклически и зависят от количества режущих и деформирующих элементов, находящихся в зоне контакта, которой является сам процесс МРВГТО, зависимость (2.1.4) можно представить в дискретной форме, где полученные выражения описывают состояние отдельных подсистем с учетом входных и выходных переменных и возмущающих воздействий, где n – номер производной:

$$\begin{cases} Z_{i(j)} = F[Z_{i(j-1)}, x^n_{i(j)}, w^n(\tau), u^n_{i(j)}]; \\ Y_{i(j)} = \Phi[Z_{i(j)}, x^n_{i(j)}, w^n(\tau), u^n_{i(j)}]; \\ i \in \{СП, И, З, ЗК, СОТС\}. \end{cases} \quad (2.1.5)$$

Значения параметров в уравнениях (2.1.4), (2.1.5) могут меняться с учетом наложенных связей (типа равенств) и в определенных границах:

$$\begin{cases} M_{\kappa pj} = \Phi^1(M_{\kappa p(j-1)}, u_j, w_j, x_j); \\ F_j = \Phi^2(F_{j-1}, u_j, w_j, x_j); \\ Ra_j = \Phi^3(Ra_{j-1}, u_j, w_j, x_j); \\ D_{2j} = \Phi^4(D_{2(j-1)}, u_j, w_j, x_j); \\ P_j = \Phi^5(P_{j-1}, u_j, w_j, x_j); \\ \dots\dots\dots \\ \alpha_{резj} = \Phi^{n-1}(\alpha_{рез(j-1)}, u_j, w_j, x_j); \\ \gamma_{резj} = \Phi^n(\gamma_{рез(j-1)}, u_j, w_j, x_j); \end{cases} \quad (2.1.6)$$

где $M_{\kappa pj}$ – крутящий момент на j -м обороте метчика, Ra_j – величина шероховатости Ra на j -м обороте; F_j – величина силы возникающей при обработке резьбы на j -м обороте, D_{2j} – средний диаметр резьбы на j -м обороте, P_j – шаг резьбы; $\alpha_{резj}$ – угол наклона боковых образующих профиль резьбы, $\gamma_{резj}$ – угол подъема резьбы.

Для обеспечения качества изделий вектор параметров состояния $Z_{i(j)}$ должен находиться в допустимой области: $Z_{\min i(j)} \leq Z_{i(j)} \leq Z_{kpi(j)}$ (связи типа неравенств).

Критическое значение вектора $Z_{kpi(j)}$ на любом обороте метчика определяют ограничения, которые состоят из технических требований к параметрам резьбового отверстия и инструменту, условиями протекания обработки и допустимыми режимами работы оборудования:

$$Z_{kpi(j)} = F[Z_{\text{дон}}, u_{\text{дон}}^n]. \quad (2.1.7)$$

Для характеристики критического значения вектора $Z_{kpi(j)}$ при резьбообработке могут быть использованы следующие ограничения:

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{крj} \leq M_{кр \text{ дон}}; \\ F_j \leq F_{\text{дон}}; \\ Ra_j \leq Ra_{\text{дон}}; \\ \dots \\ D_{отвj} \leq D_{отв. \text{ дон}}; \\ h_z \leq h_{z. \text{ дон}}; \\ \dots \\ V_j \leq V_{\text{дон}}. \end{array} \right. \quad (2.1.8)$$

Методы резьбообработки должны обеспечивать высокие качественные показатели, которые зависят от условий протекания процесса. Эти условия определяются конструктивными особенностями станка, приспособления, способами базирования, геометрией инструмента, СОЖ, точностью отверстий под формообразование резьбы, физико-механическими свойствами материала заготовки, режимами резания, которые являются связывающими звеньями между условиями формирования резьбы и параметрами качества обработки.

При получении резьб М2...М6 в глухих глубоких отверстиях существующие методы не эффективны, так как не позволяют скомпенсировать

влияние случайных возмущений $w(\tau)$, например наростообразования и пакетирования стружки, что недопустимо для рассматриваемых операций, для которых допуски на размеры резьбы ε_k являются малыми величинами.

Выполненный анализ показывает, что для дальнейшего совершенствования процессов резьбообразования М2...М6 в глухих глубоких отверстиях нужны новые способы обработки и инструменты, нечувствительные к воздействию внешних возмущений, что позволит обеспечить заданное качество обработки поверхностей. Для этого необходимо проведение дальнейших теоретических и экспериментальных исследований.

2.3 Обоснование на основе морфологического анализа структуры технологической системы мелкоразмерной резьбообработки в глухих глубоких отверстиях

В общем случае задача синтеза оптимальной технологической системы состоит в определении принципов P ее построения, совокупности технологических элементов $C = \{C_i, i = 1, n\}$ (станок, приспособление, заготовка, инструмент), связей ϖ между ними и функцией $g = \{g_1, \dots, g_n\}$ таких, что обеспечивается экстремум показателей g_0 , то есть:

$$(P, C, \varpi, g) = \text{argext } g_0(P, C, \varpi, g).$$

Принцип построения P технологической системы заключается в следующем:

1) объект представляет собой систему с открытыми границами, когда число составляющих системы и их вариантов заранее неизвестно, переход от одного варианта к другому дискретен и трудноформализуем (не может быть выражен функционально);

2) множество вариантов может быть установлено только на основе априорной информации, опыта проектировщика;

3) часть вариантов остается за границами требуемых технических решений, управление системой осуществляется от других иерархически более общих технических систем;

4) методы и средства управления устройством могут быть заранее заданы;

5) управляющие сигналы на изменение объекта производства и связанная с этим перестройка подсистем выполняется в заранее известные случайные интервалы времени.

С учетом рассмотренных особенностей синтез структур может быть выполнен на основе использования методов структурной и параметрической оптимизации (синтеза) технических систем. На рис. 2.1.1 и 2.1.2 представлена укрупненная модель формирования рациональной технологической системы для мелкоразмерной резьбообработки в глухих глубоких отверстиях (элементов и узлов, существенно снижающих точность и надежность системы) и совершенствования элементов технологической системы оборудования [17, 129].

Выполним декомпозицию технологической системы процесса мелкоразмерной резьбообработки в глухих глубоких отверстиях на подсистемы: станок «С», приспособление «П», инструмент «И», заготовка «З» [81, 82].

На примере технологической системы резьбообработки на базе станка с ЧПУ построим морфологическую матрицу (таблица 2.3.1), альтернативы которой формируем исходя из рассмотрения признаков и характеристик подсистемы и элементов, выявляя связи между ними [81, 82].

Таблица 2.3.1 – Морфологическая матрица технологической системы для внутренней резьбообработки в глухих глубоких отверстиях

Подсистема – станок «С»		
№	Узел (признак)	Характеристика узла (признака)
1	Привод главного движения – X_1	Электрический – X_{11} ; пневматический – X_{12} ; гидравлический – X_{13} ; комбинированный – X_{14} .
2	Привод подач – X_2	Равномерная – X_{21} ; прерывистая – X_{22} ; самозатягиванием – X_{23} ; принудительная – X_{24} ; копирная пара – X_{25} ; гитара – X_{26} ; программное управление – X_{27} .
3	Направляющие элементы – X_3	Качения – X_{31} ; скольжения – X_{32} ; гидростатические – X_{33} .
4	Шпиндельный узел – X_4	Предохранительное устройство – X_{41} ; без предохранительного устройства – X_{42} .
5	Револьверная головка – X_5	Ось головки $\perp$ оси инструмента – X_{51} ; Ось головки $//$ оси инструмента – X_{52} ; Ось головки под $\angle$ к оси инструмента – X_{53} ; четыре позиции – X_{54} ; шесть позиций – X_{55} ; восемь позиций – X_{56} .
6	Многошпиндельная головка – X_6	Два шпинделя – X_{61} ; три шпинделя – X_{62} ; четыре шпинделя – X_{63} ; более 4-х – X_{64} ; разное расположение шпинделей – X_{65} ; диаметральное расположение шпинделей – X_{66} ; сложное расположение шпинделей – X_{67} ; переналадка ручная – X_{68} ; переналадка механическая – X_{69} .
7	Стол – X_7	Неподвижный – X_{71} ; продольный – X_{72} ; продольно-поперечный – X_{73} ; круглый – X_{74} .

Подсистема – приспособление «П»		
1	Для зажима деталей – Y_1	Механизированное – Y_{11} ; автоматическое – Y_{12} .
2	Для позиционирования деталей – Y_2	Вручную – Y_{21} ; автоматически – Y_{22} .
3	Накопитель – Y_3	С палетами – Y_{31} ; магазинного типа – Y_{32} ; бункерный – Y_{33} ; лотковый – Y_{34} .
4	Манипулятор – Y_4	Есть – Y_{41} ; нет – Y_{42} .
Подсистема – инструмент «И»		
1	Количество инструментов – Z_1	Один – Z_{11} ; несколько – Z_{12} .
2	Тип инструмента – Z_2	Метчик – Z_{21} ; деформирующий (бесстружечный) метчик – Z_{22} ; режуще-деформирующий (комбинированный) метчик – Z_{23} .
3	Схема заборной части – Z_3	Профильная – Z_{31} ; генераторная – Z_{32} ; прогрессивная – Z_{33} .
4	Геометрия зубьев рабочей части – Z_4	Незатылованная – Z_{41} ; радиальное затылование – Z_{42} ; осевое затылование – Z_{43} ; пересечением резьб – Z_{44} .
5	Расположение рабочих вершин – Z_5	Равномерное – Z_{51} ; шахматное – Z_{52} ; сложное – Z_{53} .
6	Количество рабочих граней – Z_6	Три – Z_{61} ; четыре – Z_{62} ; шесть – Z_{63} .
7	Стружечные канавки – Z_7	Прямые – Z_{71} ; винтовые – Z_{72} ; криволинейные – Z_{73} .
8	Материал рабочей части – Z_8	Инструментальная часть – Z_{81} ; быстро-режущая сталь – Z_{82} ; твердый сплав – Z_{83} .

Подсистема – заготовка «З»		
1	Материал – W_1	Сталь конструкционная – W_{11} ; стали жаропрочные и нержавеющие – W_{12} ; цветные сплавы – W_{13} ; прочие труднообрабатываемые материалы – W_{14} .
2	Тип заготовки – W_2	Цилиндры, диски – W_{21} ; крепежные – W_{22} ; корпусные – W_{23} ; планки, пластины – W_{24} .
3	Количество отверстий – W_3	Одно – W_{31} ; несколько – W_{32} .
4	Класс точности – W_4	4Н5Н – W_{41} ; 5Н6Н – W_{42} ; 6Н – W_{43} ; 7Н – W_{44} ; 6G – W_{45} ; 7G – W_{46} .
5	Размер резьбы – W_5	Менее М2 – W_{51} ; М2...М4 – W_{52} ; М4...М6 – W_{53} .
6	Тип отверстия – W_6	Сквозное – W_{61} ; глухое – W_{62} ; глубокое – W_{63} .
7	Расположение отверстий – W_7	Рядное – W_{71} ; диаметрально – W_{72} ; смешанное – W_{73} .

После заполнения морфологической матрицы перейдем к синтезу вариантов структуры технологической системы мелкоразмерной резьбообработки в глухих глубоких отверстиях (МРвГГО). Методика поиска оптимальной структуры системы при заданных требованиях состоит в следующем. Вначале из множества признаков $n = 1, 2, \dots, N$ подсистемы «станок» (X), который имеет следующие признаки – привод главного движения – X_1 , привод подач – X_2 , направляющие элементы – X_3 , шпиндельный узел – X_4 , револьверная головка – X_5 , многошпиндельная головка – X_6 , стол – X_7 , выделим наиболее приемлемые элементы для создания технологической системы (МРвГГО). При синтезе варианта технологической системы применимы различные типы перечисленных элементов, которые обеспечат правильное функционирование системы, но имеют различные

характеристики (надёжность, габаритные размеры, масса, стоимость). Характеристики признаков из указанной таблицы 2.3.1 выбираем в качестве основы для построения графа на рисунке 2.3.1, характеризующем множество возможных вариантов подсистемы «станок» (X), которое равно числу путей в графе.

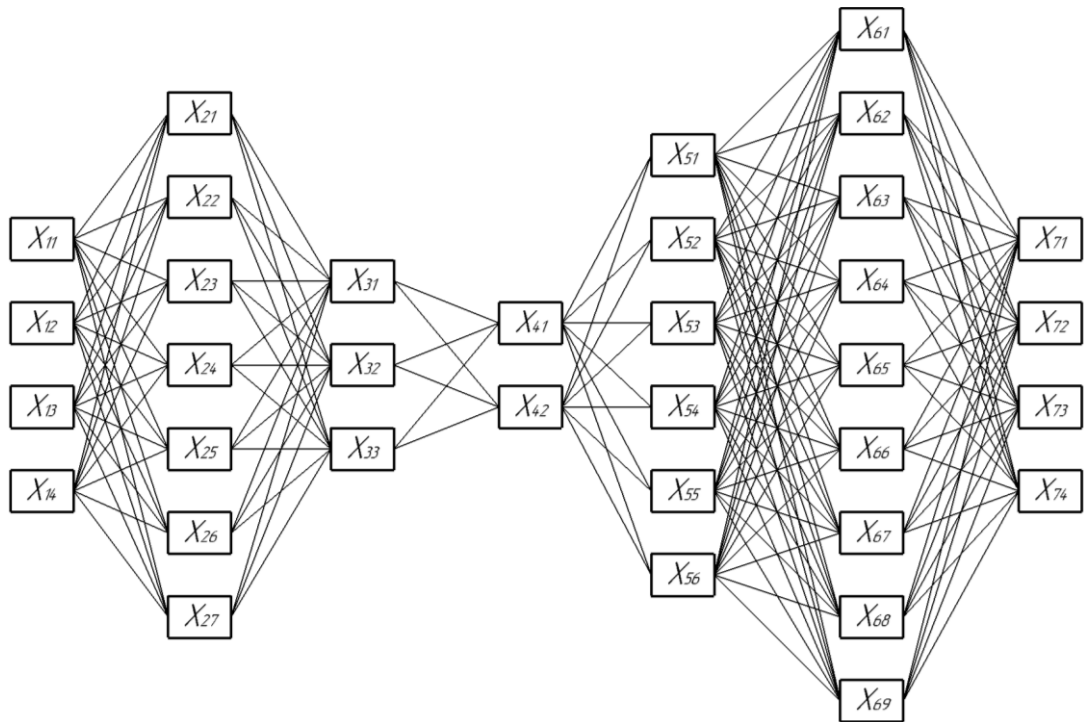


Рисунок 2.3.1 – Граф возможных структурных вариантов подсистемы «станок» (X)

С учётом большого количества вариантов синтез решения осуществляем, начиная с выбора вариантов подсистем, включая всё более и более существенные признаки. Кроме того, следует руководствоваться списком технических требований, определяющихся в первую очередь свойствами синтезируемой системы. Зададимся конкретными свойствами такого элемента, как заготовка:

1. Размер резьбы – М4...М6;
2. Тип заготовки – корпус;
3. Количество отверстий – 1;
4. Тип отверстия – глухое, глубокое;
5. Класс точности – 4Н5Н;

6. Материал – сталь нержавеющая, алюминиевые сплавы.

Обозначение и расшифровка параметров W заготовки для системы внутренней резьбообработки в глухих глубоких отверстиях приведены в морфологической матрице в таблице 2.3.1, характеристики элементов из указанной таблицы выбираем в качестве основы для построения графа (рисунок 2.3.2), характеризующем множество возможных вариантов подсистемы «заготовка», которое равно числу путей в графе.

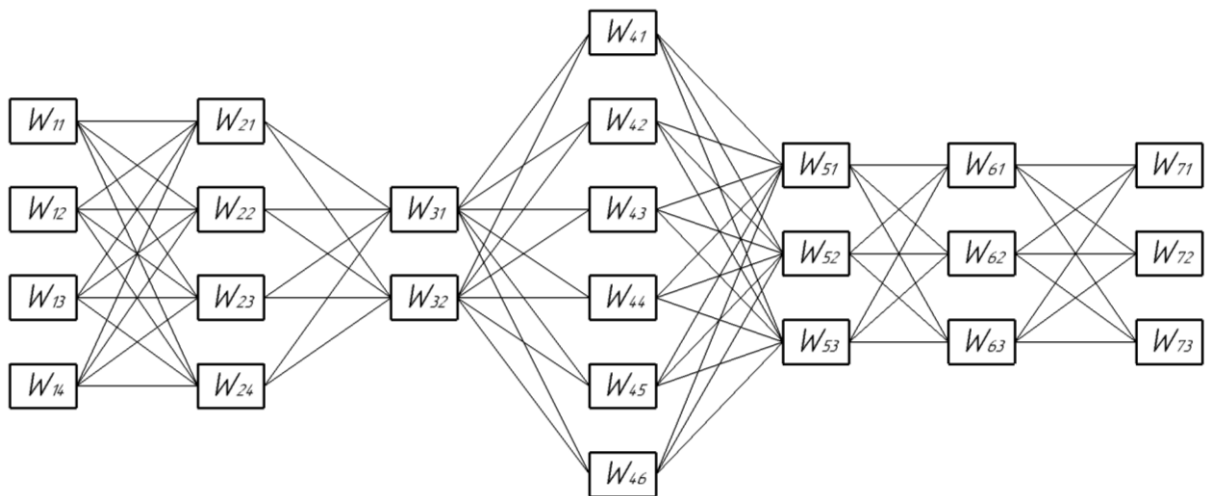


Рисунок 2.3.2 – Граф возможных структурных вариантов свойств подсистемы «заготовка» (W)

Граф заданных свойств заготовки:

$$3 = \begin{bmatrix} W_{12} \\ W_{13} \end{bmatrix} \rightarrow W_{23} \rightarrow W_{31} \rightarrow W_{41} \rightarrow W_{53} \rightarrow \begin{bmatrix} W_{62} \\ W_{63} \end{bmatrix}.$$

Структура включает в себя заготовку из материалов (стали жаропрочные и нержавеющие – W_{12} ; цветные сплавы – W_{13}), тип – корпусные – W_{23} , с одним резьбовым отверстием – W_{31} , точность 4Н5Н – W_{41} , размером резьбы М4...М6 – W_{53} , тип отверстия – глухое – W_{62} и глубокое – W_{63} .

Вначале выбираем технологический элемент «станок», проводя выбор требований на основе качественных показателей K_i^* :

1. Настройка режимов обработки – K_1^1 : (0,5 – ручная, 0,75 – механизированная; 1,0 – автоматическая);

2. Способ смены инструмента – K_2^1 : (0,5 – ручной; 0,75 – механизированный; 1,0 – автоматический);
3. Наличие предохранительных устройств – K_3^1 : (0,5 – нет, 1,0 – есть);
4. Возможность многооперационной обработки – K_4^1 : (0,5 – нет; 1,0 – есть);
5. Система управления – K_5^1 : (0,5 – программное управление по циклу; 0,75 – ЧПУ (NC), 1,0 – ЧПУ типа CNC);
6. Возможность реализации на базе известных конструкций – K_6^1 : (0,5 – нет; 0,75 – частично; 1,0 – полностью).

Обозначение и расшифровка параметров X станка для технологической системы ВРвГГО приведены в морфологической матрице в таблице 2.3.1, характеристики элементов из указанной таблицы выбираем в качестве основы для построения графа (рисунок 2.3.2), характеризующем множество возможных вариантов подсистемы «станок», которое равно числу путей в графе.

По формуле $K_c = 1 - \sum_{i=1}^n \frac{1 - K_i}{n}$ определяем суммарный качественный показатель для каждой из возможных структур. Наибольшее значение $K_c = 0,8$ принадлежит варианту станка:

$$C = X_{11} \rightarrow \begin{bmatrix} X_{22} \\ X_{24} \\ X_{27} \end{bmatrix} \rightarrow X_{31} \rightarrow X_{41} \rightarrow X_{51} \rightarrow X_{73}.$$

Выбранная структура «С» содержит узлы и характеристики, позволяющие с электрическим приводом главного движения, приводом прерывистой принудительной осевой подачи с программным управлением, с направляющими качения, предохранительным устройством шпиндельного узла, револьверной головкой и продольно-поперечным столом обеспечить

точные формообразующие движения для резбобработки в глухих глубоких отверстиях.

Качественные показатели K_i'' «приспособления» выбирали в соответствии со следующими техническими требованиями:

1. Способ загрузки и базирования – K_1^{11} :
(0,5 – ручной; 0,75 – механизированный; 1,0 – автоматический);
2. Позиционирование – K_2^{11} :
(0,5 – ручное; 0,75 – механизированное; 1,0 – автоматическое);
3. Возможность реализации на базе известных конструкций – K_3^{11} :
(0,5 – нет; 0,75 – частично; 1,0 – полностью).

Обозначение и расшифровка параметров Y приспособления для технологической системы ВРвГГО приведены в морфологической матрице в таблице 2.3.1, характеристики элементов из указанной таблицы выбираем в качестве основы для построения графа (рисунок 2.3.3), характеризующем множество возможных вариантов подсистемы «приспособление», которое также равно числу путей в графе.

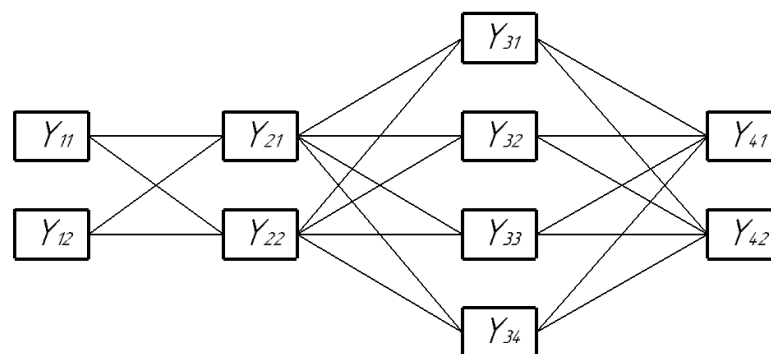


Рисунок 2.3.3 – Граф возможных структурных вариантов подсистемы «приспособление» (Y)

Качественные показатели K_i'' «приспособления» выбирали в соответствии со следующими техническими требованиями:

1. Способ загрузки и базирования – K_1^{11} :

(0,5 – ручной; 0,75 – механизированный; 1,0 – автоматический);

2. Позиционирование – K_2^{11} :

(0,5 – ручное; 0,75 – механизированное; 1,0 – автоматическое);

3. Возможность реализации на базе известных конструкций – K_3^{11} :

(0,5 – нет; 0,75 – частично; 1,0 – полностью).

По аналогии определяем суммарный качественный показатель для приспособления, наибольшую величину которого ($K_{II} = 1,0$) имеет структура:

$$II = Y_{12} \rightarrow Y_{22} \rightarrow Y_{34} \rightarrow Y_{41}.$$

Структура «II» включает в себя автоматические устройства зажима и позиционирования деталей, а также манипулятор для загрузки и разгрузки заготовок.

После этого выбираем по наибольшему качественному показателю K_I^{III} структуру «инструмента» на основании технических требований:

1. Стойкость K_1^{III} (0,75 – нормативная; 1,0 – повышенная);

2. Прочность K_2^{III} (0,75 – нормативная прочность стандартного инструмента; 1,0 – повышенная);

3. Регулирование геометрических параметров, переналадка K_3^{III} (0,5 – нерегулируемые; 0,75 – регулировка вручную; 1,0 – автоматическая).

Обозначение и расшифровка параметров Z инструмента для технологической системы ВРвГГО приведены в морфологической матрице в таблице 2.3.1, характеристики элементов из указанной таблицы выбираем в качестве основы для построения графа (рисунок 2.3.4), характеризующем множество возможных вариантов подсистемы «инструмент», которое также равно числу путей в графе.

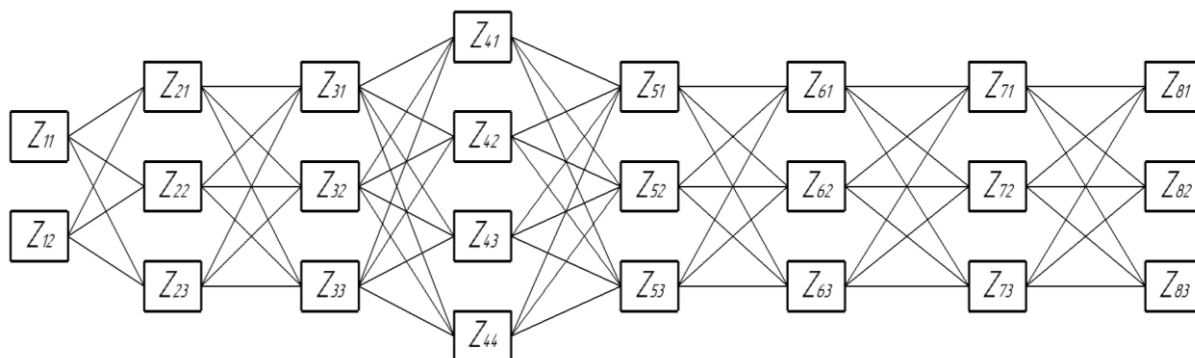


Рисунок 2.3.4 – Граф возможных структурных вариантов подсистемы «инструмент» (Z)

Максимальный качественный показатель $K_{II} = 0,75$ получили три варианта « I » инструмента:

$$I_1 = Z_{11} \rightarrow Z_{21} \rightarrow Z_{32} \rightarrow Z_{42} \rightarrow Z_{51} \rightarrow Z_{61} \rightarrow Z_{72} \rightarrow Z_{83};$$

$$I_2 = Z_{11} \rightarrow Z_{23} \rightarrow Z_{31} \rightarrow Z_{44} \rightarrow Z_{51} \rightarrow Z_{61} \rightarrow Z_{71} \rightarrow Z_{82};$$

$$I_3 = Z_{11} \rightarrow Z_{23} \rightarrow Z_{31} \rightarrow Z_{44} \rightarrow Z_{51} \rightarrow Z_{61} \rightarrow Z_{73} \rightarrow Z_{82}.$$

Структуры I_1 , I_2 , I_3 имеют принципиальные конструктивные отличия прежде всего по способу формообразования резьбы (I_1 – методом снятия стружки; I_2 – методом пластической деформации; I_3 – сочетанием резания и пластического деформирования). В условиях гибкой автоматизации широкий диапазон обрабатываемых материалов не позволяет однозначно выбрать оптимальную структуру инструмента. Для выявления конструкций, приемлемых для широкого диапазона обрабатываемых материалов, необходимы дополнительные экспериментальные исследования и более точные критерии, учитывающие надежность и переналаживаемость. На рисунке 2.3.5 приведены конструкции некоторых типов метчиков, в результате морфологического анализа признанные наиболее рациональными. Это режущий метчик структуры I_1 типа Т880 с винтовыми канавками

(таблица 1.2.1, рисунок 2.3.5, *a*), а также варианты структур I_2 деформирующего метчика и режуще-деформирующего I_3 , разработанные в СевГУ, рабочая часть которых получена пересечением многозаходных резьб с основной резьбой [2, 4, 5] (рисунки 2.3.5, *б*, *в*).

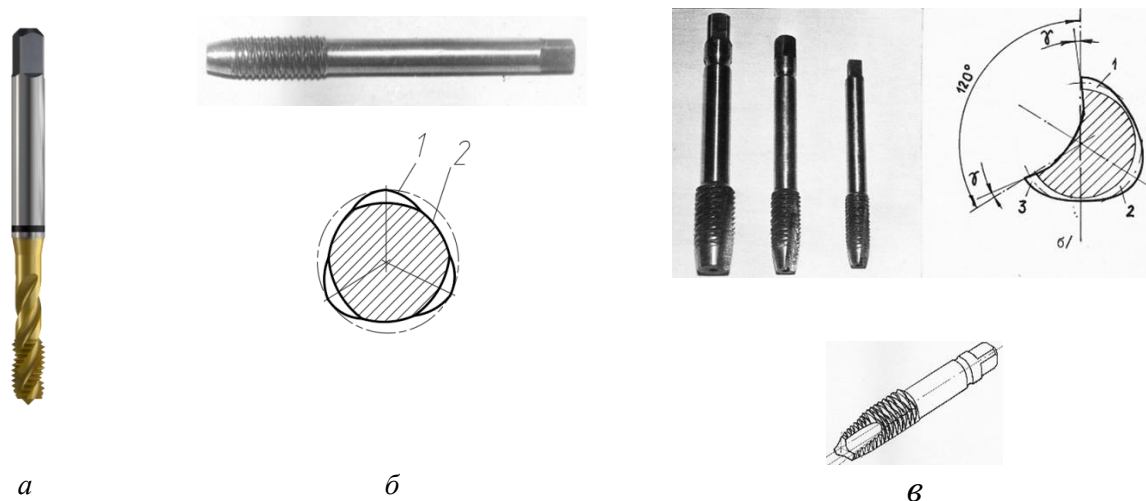


Рисунок 2.3.5 – Рациональные структурные варианты I_1 (*a*), I_2 (*б*), I_3 (*в*) подсистемы «инструмент» (*Z*) по результатам морфологического анализа

На этапе структурно-компоновочного синтеза можно ограничиться применением качественного критерия. Морфологический анализ позволил выявить из сформированного множества вариантов для обработки МРвГГО три рациональных варианта (рисунок 2.3.6):

- 1) $C \rightarrow П \rightarrow I_1$; 2) $C \rightarrow П \rightarrow I_2$; 3) $C \rightarrow П \rightarrow I_3$.

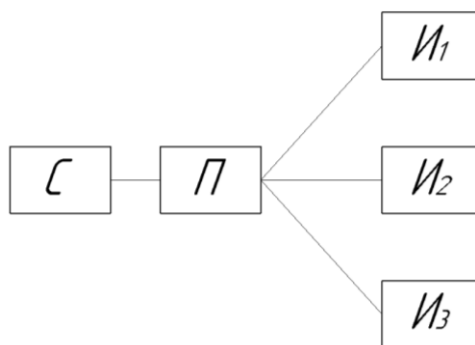


Рисунок 2.3.6 – Граф возможных рациональных вариантов технологической системы МРвГГО

Для полной информации и объективной оценки предпочтительного варианта необходим учет стохастических процессов, происходящих в реальных условиях функционирования.

2.4 Анализ надежности и переналаживаемости технологической системы при получении МРвГГО

Для оценки надёжности вариантов выбранных технологических систем для получения МРвГГО необходимо рассмотреть особенности возникновения отказов функционирования (эксплуатационную надёжность) и параметрических отказов (технологическую надёжность) системы в реальных условиях функционирования.

На рисунке 2.4.1 представлена структурная схема отказов при МРвГГО. Во время процесса МРвГГО в системе станка могут произойти параметрический отказ, отказ функционирования узлов станка или отдельных элементов, что, в свою очередь, приводит к снижению надёжности станка.

В качестве наиболее соответствующей выбранной в результате морфологического анализа структуре «С» станка, содержащей узлы и характеристики, позволяющие с электрическим приводом главного движения, приводом прерывистой принудительной осевой подачи с программным управлением, с направляющими качения, предохранительным устройством шпиндельного узла, инструментальным магазином и продольно-поворотным столом обеспечить точные формообразующие движения для резьбообработки в глухих глубоких отверстиях целесообразно использование многооперационного обрабатывающего центра мод. MAXXmill 630 (рисунок 2.4.2) [76].

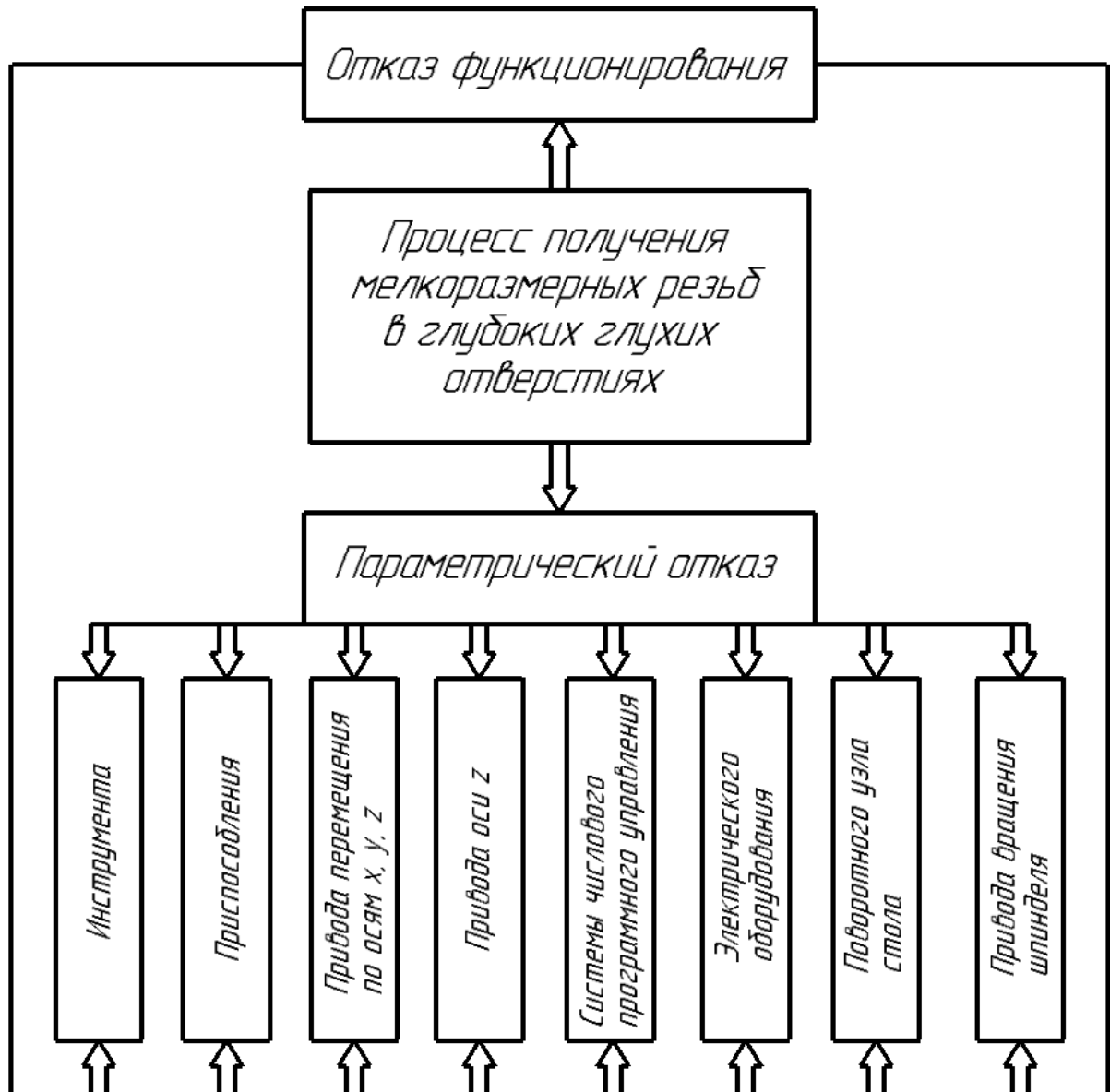


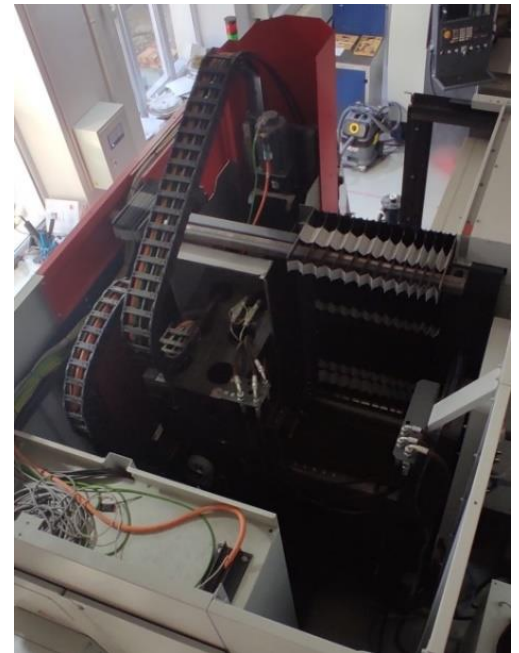
Рисунок 2.4.1 – Структурная схема отказов при МРВГТО

Для определения его надежности построим размеченный граф состояний системы станка (рисунок 2.4.3), основанный на его конструкции, включающий в себя основные подсистемы, узлы станка и интенсивности переходов из состояния в состояние [78].

Основные состояния системы и ее характеристики, такие как вероятности нахождения системы в состояниях и интенсивности переходов из состояния в состояние сведены в таблицу 2.4.1.



а



б

Рисунок 2.4.2 – Общий вид (а) и вид сверху станка мод. MAXXmill 630

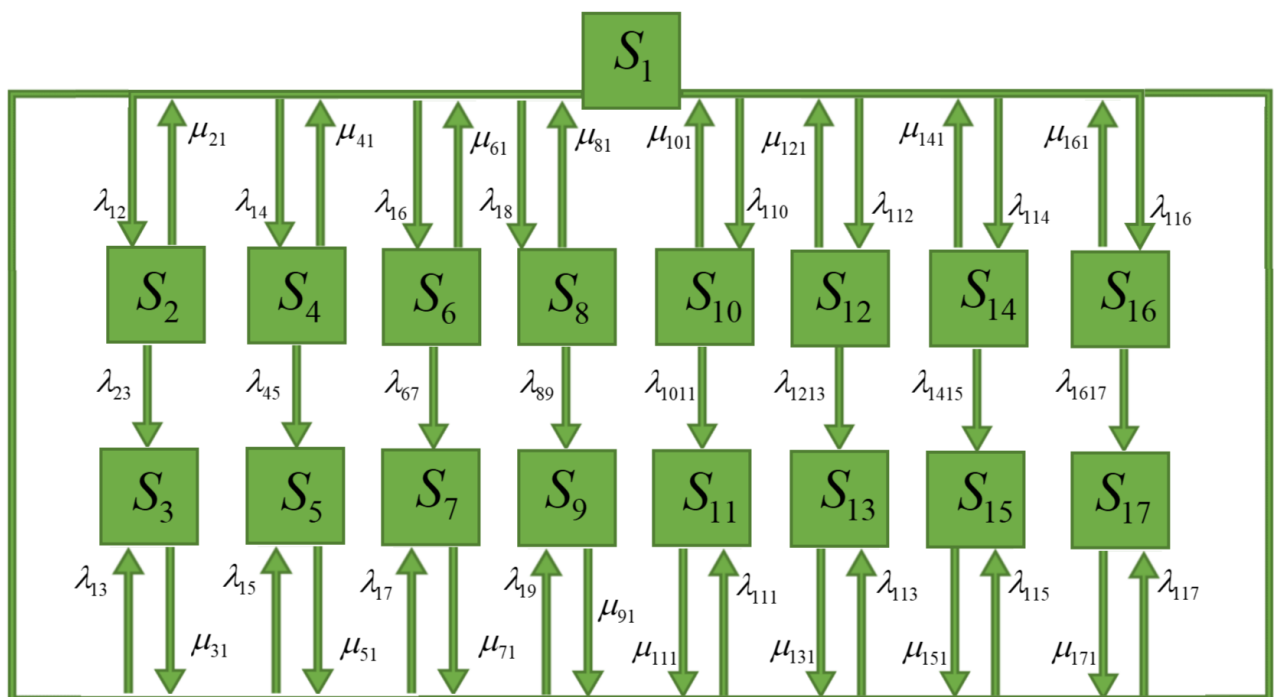


Рисунок 2.4.3 – Граф состояний станка с учетом отказов и восстановлений его подсистем

Таблица 2.4.1 – Состояния системы и её характеристики

Состояние системы S_i / Вероятность нахождения системы в i -м состоянии P_i	Интенсивности λ_{ij}, μ_{ij} переходов из состояний S_i
S_1 – безотказная работа / P_1	$S_1 \rightarrow S_2 - \lambda_{12}; S_1 \rightarrow S_3 - \lambda_{13};$ $S_1 \rightarrow S_4 - \lambda_{14}; S_1 \rightarrow S_5 - \lambda_{15};$ $S_1 \rightarrow S_6 - \lambda_{16}; S_1 \rightarrow S_7 - \lambda_{17};$ $S_1 \rightarrow S_8 - \lambda_{18}; S_1 \rightarrow S_9 - \lambda_{19};$ $S_1 \rightarrow S_{10} - \lambda_{110}; S_1 \rightarrow S_{11} - \lambda_{111};$ $S_1 \rightarrow S_{12} - \lambda_{112}; S_1 \rightarrow S_{13} - \lambda_{113};$ $S_1 \rightarrow S_{14} - \lambda_{114}; S_1 \rightarrow S_{15} - \lambda_{115};$ $S_1 \rightarrow S_{16} - \lambda_{116}; S_1 \rightarrow S_{17} - \lambda_{117}$
S_2 – параметрический отказ инструмента / P_2	$S_2 \rightarrow S_3 - \lambda_{23}; S_2 \rightarrow S_1 - \mu_{21}$
S_3 – отказ функционирования инструмента / P_3	$S_3 \rightarrow S_1 - \mu_{31}$
S_4 – параметрический отказ приспособления / P_4	$S_4 \rightarrow S_5 - \lambda_{45}; S_4 \rightarrow S_1 - \mu_{41}$
S_5 – отказ функционирования приспособления / P_5	$S_5 \rightarrow S_1 - \mu_{51}$
S_6 – параметрический отказ привода перемещения по осям x, y, z / P_6	$S_6 \rightarrow S_7 - \lambda_{67}; S_6 \rightarrow S_1 - \mu_{61}$
S_7 – отказ функционирования привода перемещения по осям x, y, z / P_7	$S_7 \rightarrow S_1 - \mu_{71}$
S_8 – параметрический отказ привода оси z / P_8	$S_8 \rightarrow S_9 - \lambda_{89}; S_8 \rightarrow S_1 - \mu_{81}$
S_9 – отказ функционирования привода оси z / P_9	$S_9 \rightarrow S_1 - \mu_{91}$
S_{10} – параметрический отказ СЧПУ / P_{10}	$S_{10} \rightarrow S_{11} - \lambda_{1011}; S_{10} \rightarrow S_1 - \mu_{101}$
S_{11} – отказ функционирования СЧПУ / P_{11}	$S_{11} \rightarrow S_1 - \mu_{111}$
S_{12} – параметрический отказ электрического оборудования / P_{12}	$S_{12} \rightarrow S_{13} - \lambda_{1213}; S_{12} \rightarrow S_1 - \mu_{121}$
S_{13} – отказ функционирования электрического оборудования / P_{13}	$S_{13} \rightarrow S_1 - \mu_{131}$

Продолжение таблицы 2.4.1

S_{14} – параметрический отказ поворотного узла стола / P_{14}	$S_{14} \rightarrow S_{15} - \lambda_{1415}; S_{14} \rightarrow S_1 - \mu_{141}$
S_{15} – отказ функционирования поворотного узла стола / P_{15}	$S_{15} \rightarrow S_1 - \mu_{151}$
S_{16} – параметрический отказ привода вращения шпинделя / P_{16}	$S_{16} \rightarrow S_{17} - \lambda_{1617};$ $S_{16} \rightarrow S_1 - \mu_{161}$
S_{17} – отказ функционирования привода вращения шпинделя / P_{17}	$S_{17} \rightarrow S_1 - \mu_{171}$

Уравнения для финальных вероятностей $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8, P_9, P_{10}, P_{11}, P_{12}, P_{13}, P_{14}, P_{15}, P_{16}, P_{17}$ состояний $S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8, S_9, S_{10}, S_{11}, S_{12}, S_{13}, S_{14}, S_{15}, S_{16}, S_{17}$ можно представить в виде системы уравнений А.Н. Колмогорова:

$$\left\{ \begin{array}{l}
 \mu_{21} \cdot P_2 + \mu_{31} \cdot P_3 + \mu_{41} \cdot P_4 + \mu_{51} \cdot P_5 + \mu_{61} \cdot P_6 + \mu_{71} \cdot P_7 + \mu_{81} \cdot P_8 + \mu_{91} \cdot P_9 + \mu_{101} \cdot P_{10} + \mu_{111} \cdot P_{11} + \\
 + \mu_{121} \cdot P_{12} + \mu_{131} \cdot P_{13} + \mu_{141} \cdot P_{14} + \mu_{151} \cdot P_{15} + \mu_{161} \cdot P_{16} + \mu_{171} \cdot P_{17} = (\lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14} + \lambda_{15} + \lambda_{16} + \lambda_{17} + \\
 + \lambda_{18} + \lambda_{19} + \lambda_{110} + \lambda_{111} + \lambda_{112} + \lambda_{113} + \lambda_{114} + \lambda_{115} + \lambda_{116} + \lambda_{117}) \cdot P_1; \\
 \lambda_{12} \cdot P_1 = (\mu_{21} + \lambda_{23}) \cdot P_2; \\
 \lambda_{23} \cdot P_2 + \lambda_{13} \cdot P_1 = \mu_{31} \cdot P_3; \\
 \lambda_{14} \cdot P_1 = (\mu_{41} + \lambda_{45}) \cdot P_4; \\
 \lambda_{45} \cdot P_4 + \lambda_{15} \cdot P_1 = \mu_{51} \cdot P_5; \\
 \lambda_{16} \cdot P_1 = (\mu_{61} + \lambda_{67}) \cdot P_6; \\
 \lambda_{67} \cdot P_6 + \lambda_{17} \cdot P_1 = \mu_{71} \cdot P_7; \\
 \lambda_{18} \cdot P_1 = (\mu_{81} + \lambda_{89}) \cdot P_8; \\
 \lambda_{89} \cdot P_8 + \lambda_{19} \cdot P_1 = \mu_{91} \cdot P_9; \\
 \lambda_{110} \cdot P_1 = (\mu_{101} + \lambda_{1011}) \cdot P_{10}; \\
 \lambda_{1011} \cdot P_{10} + \lambda_{111} \cdot P_1 = \mu_{111} \cdot P_{11}; \\
 \lambda_{112} \cdot P_1 = (\mu_{121} + \lambda_{1213}) \cdot P_{12}; \\
 \lambda_{1213} \cdot P_{12} + \lambda_{113} \cdot P_1 = \mu_{131} \cdot P_{13}; \\
 \lambda_{114} \cdot P_1 = (\mu_{141} + \lambda_{1415}) \cdot P_{14}; \\
 \lambda_{1415} \cdot P_{14} + \lambda_{115} \cdot P_1 = \mu_{151} \cdot P_{15}; \\
 \lambda_{116} \cdot P_1 = (\mu_{161} + \lambda_{1617}) \cdot P_{16}; \\
 \lambda_{1617} \cdot P_{16} + \lambda_{117} \cdot P_1 = \mu_{171} \cdot P_{17}.
 \end{array} \right. \quad (2.4.1)$$

Решение системы уравнений (2.4.1) с помощью условия нормировки $P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 + P_6 + P_7 + P_8 + P_9 + P_{10} + P_{11} + P_{12} + P_{13} + P_{14} + P_{15} + P_{16} + P_{17} = 1$ позволяет

получить выражения для $P_1, P_2, P_3, P_4, P_5, P_6, P_7, P_8, P_9, P_{10}, P_{11}, P_{12}, P_{13}, P_{14}, P_{15}, P_{16}, P_{17}$. На основании проведенных исследований аналогичных объектов [61], примем следующие значения интенсивностей. На основе принятых значений интенсивностей получим расчетные значения вероятностей из системы уравнений (2.4.1). Принятые значения интенсивностей и расчетные значения вероятностей нахождения системы в состояниях сведены в таблицу 2.4.2.

Из расчетных значений следует, что наибольшее влияние на надежность технологической системы станка оказывают инструмент и приспособление, откуда следует вывод, что для увеличения значения вероятности нахождения системы в состоянии безотказной работы необходима оптимизация данных параметров.

Таблица 2.4.2 – Принятые значения интенсивностей λ_{ij} , μ_{ij} переходов из состояний S_i

Состояние системы	Интенсивности λ_{ij} , μ_{ij} переходов из состояния S_i , ч^{-1}	Значение вероятности нахождения системы в состоянии
S_1	$\lambda_{12} = 3,971 \cdot 10^{-3}$; $\lambda_{13} = 13,237 \cdot 10^{-3}$; $\lambda_{14} = 1,838 \cdot 10^{-3}$; $\lambda_{15} = 6,129 \cdot 10^{-3}$; $\lambda_{16} = 0,579 \cdot 10^{-3}$; $\lambda_{17} = 1,930 \cdot 10^{-3}$; $\lambda_{18} = 0,357 \cdot 10^{-3}$; $\lambda_{19} = 1,193 \cdot 10^{-3}$; $\lambda_{110} = 0,347 \cdot 10^{-3}$; $\lambda_{111} = 1,157 \cdot 10^{-3}$; $\lambda_{112} = 0,461 \cdot 10^{-3}$; $\lambda_{113} = 1,539 \cdot 10^{-3}$; $\lambda_{114} = 0,378 \cdot 10^{-3}$; $\lambda_{115} = 1,263 \cdot 10^{-3}$; $\lambda_{116} = 0,357 \cdot 10^{-3}$; $\lambda_{117} = 1,190 \cdot 10^{-3}$	$P_1 = 0,175$
S_2	$\lambda_{23} = 0,794 \cdot 10^{-3}$; $\mu_{21} = 12,408 \cdot 10^{-3}$	$P_2 = 0,032$
S_3	$\mu_{31} = 41,360 \cdot 10^{-3}$	$P_3 = 0,057$
S_4	$\lambda_{45} = 0,367 \cdot 10^{-3}$; $\mu_{41} = 3,676 \cdot 10^{-3}$	$P_4 = 0,079$
S_5	$\mu_{51} = 12,256 \cdot 10^{-3}$	$P_5 = 0,090$
S_6	$\lambda_{67} = 0,115 \cdot 10^{-3}$; $\mu_{61} = 1,158 \cdot 10^{-3}$	$P_6 = 0,079$

S_7	$\mu_{71} = 3,861 \cdot 10^{-3}$	$P_7 = 0,090$
S_8	$\lambda_{89} = 0,071 \cdot 10^{-3}; \mu_{81} = 2,982 \cdot 10^{-3}$	$P_8 = 0,020$
S_9	$\mu_{91} = 9,941 \cdot 10^{-3}$	$P_9 = 0,021$
S_{10}	$\lambda_{1011} = 0,069 \cdot 10^{-3}; \mu_{101} = 2,892 \cdot 10^{-3}$	$P_{10} = 0,020$
S_{11}	$\mu_{111} = 9,640 \cdot 10^{-3}$	$P_{11} = 0,022$
S_{12}	$\lambda_{1213} = 0,092 \cdot 10^{-3}; \mu_{121} = 0,923 \cdot 10^{-3}$	$P_{12} = 0,079$
S_{13}	$\mu_{131} = 3,078 \cdot 10^{-3}$	$P_{13} = 0,091$
S_{14}	$\lambda_{1415} = 0,075 \cdot 10^{-3}; \mu_{141} = 1,647 \cdot 10^{-3}$	$P_{14} = 0,038$
S_{15}	$\mu_{151} = 5,491 \cdot 10^{-3}$	$P_{15} = 0,041$
S_{16}	$\lambda_{1617} = 0,071 \cdot 10^{-3}; \mu_{161} = 2,973 \cdot 10^{-3}$	$P_{16} = 0,020$
S_{17}	$\mu_{171} = 9,910 \cdot 10^{-3}$	$P_{17} = 0,021$

2.5 Надежность инструмента при МРвГГО

Основываясь на расчетных значениях финальных вероятностей из системы уравнений (2.4.1) очевидно, что инструмент существенным образом влияет на надежность технологической системы станка [8, 9, 61, 62, 65, 98]. В связи с этим, рассмотрим отдельно граф состояний инструмента (таблица 2.5.1), который представлен на рисунке 2.5.1 [80]. Уравнения для финальных вероятностей P_1, P_2, P_3, P_4 состояний S_1, S_2, S_3, S_4 можно представить в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} (\lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14}) \cdot P_1 = \mu_{21} \cdot P_2 + \mu_{41} \cdot P_4 \\ \mu_{21} \cdot P_2 = \lambda_{12} \cdot P_1 + \mu_{32} \cdot P_3 \\ (\mu_{32} + \lambda_{34}) \cdot P_3 = \lambda_{13} \cdot P_1 \\ \mu_{41} \cdot P_4 = \lambda_{34} \cdot P_3 + \lambda_{14} \cdot P_1 \end{cases} \quad (2.5.1)$$

Таблица 2.5.1 – Состояния системы и её характеристики

Состояние системы S_i / Вероятность нахождения системы в i -м состоянии P_i	Интенсивности λ_{ij}, μ_{ij} переходов из состояний S_i
S_1 – безотказная работа / P_1	$S_1 \rightarrow S_2 - \lambda_{12}; S_1 \rightarrow S_3 - \lambda_{13}; S_1 \rightarrow S_4 - \lambda_{14}$
S_2 – переналадка инструмента / P_2	$S_2 \rightarrow S_1 - \mu_{21}$
S_3 – параметрический отказ инструмента / P_3	$S_3 \rightarrow S_4 - \lambda_{34}; S_3 \rightarrow S_2 - \mu_{32}$
S_4 – отказ функционирования инструмента / P_4	$S_4 \rightarrow S_1 - \mu_{41}$

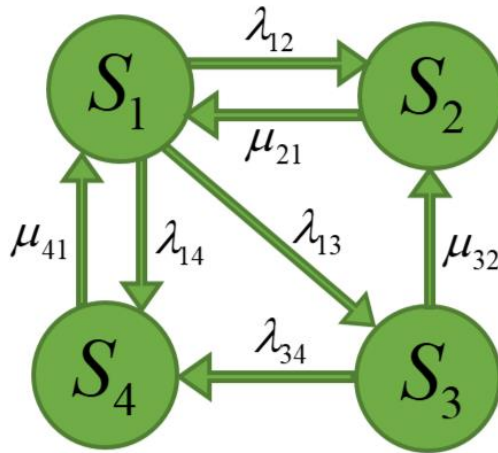


Рисунок 2.5.1 – Размеченный граф состояний инструмента с учетом переналадки и отказов параметрических и функционирования

Решение системы уравнений (2.5.1) с помощью условия нормировки $P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 1$ позволяет получить выражения для P_1, P_2, P_3, P_4 следующего вида:

$$\begin{cases}
 P_1 = (\mu_{21} \cdot \mu_{41} \cdot (\mu_{32} + \lambda_{34})) \cdot (\lambda_{12} \cdot \mu_{32} \cdot \mu_{41} + \lambda_{12} \cdot \lambda_{34} \cdot \mu_{41} + \lambda_{13} \cdot \mu_{32} \cdot \mu_{41} + \lambda_{13} \cdot \lambda_{34} \cdot \mu_{21} + \\
 + \lambda_{13} \cdot \mu_{21} \cdot \mu_{41} + \lambda_{14} \cdot \mu_{32} \cdot \mu_{21} + \lambda_{14} \cdot \lambda_{34} \cdot \mu_{21} + \mu_{32} \cdot \mu_{21} \cdot \mu_{41} + \lambda_{34} \cdot \mu_{21} \cdot \mu_{41})^{-1}; \\
 P_2 = ((\lambda_{12} \cdot \mu_{32} + \lambda_{12} \cdot \lambda_{34} + \lambda_{13} \cdot \mu_{32}) \cdot \mu_{41}) \cdot (\lambda_{12} \cdot \mu_{32} \cdot \mu_{41} + \lambda_{12} \cdot \lambda_{34} \cdot \mu_{41} + \lambda_{13} \cdot \mu_{32} \cdot \mu_{41} + \\
 + \lambda_{13} \cdot \lambda_{34} \cdot \mu_{21} + \lambda_{13} \cdot \mu_{21} \cdot \mu_{41} + \lambda_{14} \cdot \mu_{32} \cdot \mu_{21} + \lambda_{14} \cdot \lambda_{34} \cdot \mu_{21} + \mu_{32} \cdot \mu_{21} \cdot \mu_{41} + \lambda_{34} \cdot \mu_{21} \cdot \mu_{41})^{-1}; \\
 P_3 = (\lambda_{13} \cdot \mu_{21} \cdot \mu_{41}) \cdot (\lambda_{12} \cdot \mu_{32} \cdot \mu_{41} + \lambda_{12} \cdot \lambda_{34} \cdot \mu_{41} + \lambda_{13} \cdot \mu_{32} \cdot \mu_{41} + \lambda_{13} \cdot \lambda_{34} \cdot \mu_{21} + \lambda_{13} \cdot \mu_{21} \cdot \mu_{41} + \\
 + \lambda_{14} \cdot \mu_{32} \cdot \mu_{21} + \lambda_{14} \cdot \lambda_{34} \cdot \mu_{21} + \mu_{32} \cdot \mu_{21} \cdot \mu_{41} + \lambda_{34} \cdot \mu_{21} \cdot \mu_{41})^{-1}; \\
 P_4 = (\mu_{21} \cdot (\lambda_{13} \cdot \lambda_{34} + \lambda_{14} \cdot \mu_{32} + \lambda_{14} \cdot \lambda_{34})) \cdot (\lambda_{12} \cdot \mu_{32} \cdot \mu_{41} + \lambda_{12} \cdot \lambda_{34} \cdot \mu_{41} + \lambda_{13} \cdot \mu_{32} \cdot \mu_{41} + \\
 + \lambda_{13} \cdot \lambda_{34} \cdot \mu_{21} + \lambda_{13} \cdot \mu_{21} \cdot \mu_{41} + \lambda_{14} \cdot \mu_{32} \cdot \mu_{21} + \lambda_{14} \cdot \lambda_{34} \cdot \mu_{21} + \mu_{32} \cdot \mu_{21} \cdot \mu_{41} + \lambda_{34} \cdot \mu_{21} \cdot \mu_{41})^{-1}.
 \end{cases}$$

Примем значения интенсивностей с учетом реальных показателей наработок на отказы инструмента, среднего времени между переналадками, а также среднего времени восстановления после отказов, и среднего времени переналадки, ч^{-1} :

$$\lambda_{12} = 0,007 \cdot 10^{-3}; \quad \mu_{21} = 12,408 \cdot 10^{-3}; \quad \lambda_{13} = 3,971 \cdot 10^{-3}; \quad \lambda_{32} = 6,289 \cdot 10^{-3}; \quad \lambda_{34} = 0,794 \cdot 10^{-3}; \\ \lambda_{41} = 13,237 \cdot 10^{-3}; \quad \mu_{41} = 41,360 \cdot 10^{-3}.$$

На основе принятых значений, получим расчетные значения для финальных вероятностей системы уравнений (2.5.1): $P_1 = 0,703$, $P_2 = 0,002$, $P_3 = 0,003$, $P_4 = 0,290$.

Получив значения финальных вероятностей, необходимо рассчитать коэффициент простоя системы:

$$K_n = P_2 + P_3 + P_4 = 0,295. \quad (2.5.2)$$

Для повышения точности результатов рассмотрим данную систему в полумарковском виде [77]. Граф состояний инструмента представлен на рисунке 2.5.2.

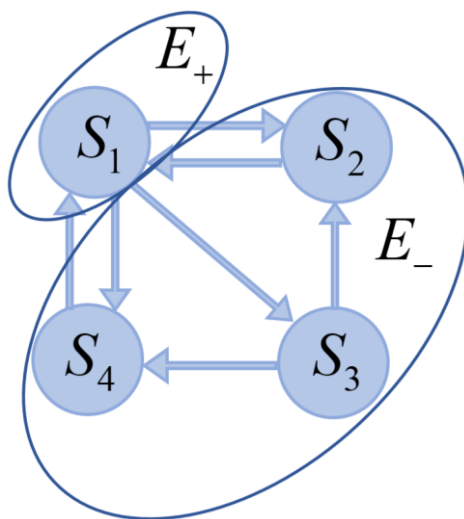


Рисунок 2.5.2 – Граф состояний инструмента в полумарковской системе

Система включает в себя следующие состояния: S_1 – безотказная работа; S_2 – переналадка; S_3 – параметрический отказ (до переналадки x , до отказа y);

S_4 – отказ функционирования; α_1 – среднее время наработки на отказ; β_1 – среднее время восстановления после отказа функционирования (G1); α_3 – среднее время до контроля момента параметрического отказа; α_4 – среднее время до переналадки; β_4 – среднее время переналадки.

Для описания функционирования системы используем полумарковские состояния: $E = \{S_1, S_2, S_3, S_4\}$.

Время пребывания в состояниях будет иметь вид:

$$\theta_1 = \alpha_1 \wedge \alpha_3 \wedge \alpha_4; \quad \theta_3 = x \wedge y; \quad \theta_4 = \beta_1.$$

Для данной системы подмножества работоспособных E_+ и неработоспособных E_- состояний имеют вид [46]: $E_+ = \{S_1\}; E_- = \{S_2, S_3, S_4\}$.

Требуется произвести укрупнение системы, то есть перейти от системы с непрерывным фазовым пространством состояний к системе с дискретными состояниями.

В таком случае непрерывные компоненты будут равны:

$$x = \{\alpha_4 - \alpha_3\}^+; \quad y = \{\alpha_1 - \alpha_3\}^+.$$

Отсюда функции распределения имеют вид [63, 64]:

$$\bar{R}_x(t) = \frac{\int_0^\infty [R_4(t+y) - R_4(t)] r_3(t) dy}{\int_0^\infty [1 - R_4(t)] r_3(t) dt}; \quad \bar{R}_y(t) = \frac{\int_0^\infty [R_1(t+y) - R_1(t)] r_3(t) dy}{\int_0^\infty [1 - R_1(t)] r_3(t) dt}.$$

Определим вероятности переходов системы:

$$P_1^2 = \int_0^\infty r_4(t) \bar{R}_1(t) \bar{R}_3(t) dt; \quad P_1^3 = \int_0^\infty r_3(t) \bar{R}_1(t) \bar{R}_4(t) dt;$$

$$P_1^4 = \int_0^\infty r_1(t) \bar{R}_3(t) \bar{R}_4(t) dt; \quad P_3^2 = \int_0^\infty r_x(t) \bar{R}_y(t) dt; \quad P_3^4 = \int_0^\infty r_y(t) \bar{R}_x(t) dt.$$

Найдем функции распределения времени пребывания системы в состояниях:

$$F_1(t) = 1 - \overline{R}_1(t) \cdot \overline{R}_3(t) \cdot \overline{R}_4(t); \quad F_3(t) = 1 - \overline{R}_x(t) \cdot \overline{R}_y(t); \quad F_4(t) = G_1(t).$$

На рисунке 2.5.3 представлен график функций распределения времени пребывания системы в состояниях.

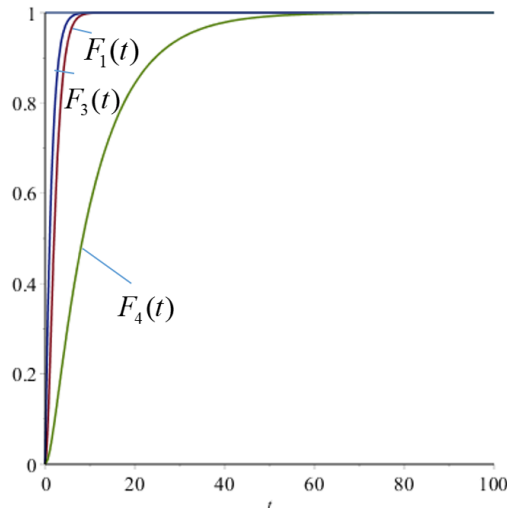


Рисунок 2.5.3 – Функции распределения времени пребывания в состояниях

Для получения искомых характеристик находится стационарное распределение вложенной цепи Маркова (ВЦМ). Составим систему уравнений:

$$\begin{cases} \rho_1 = \rho_2 + \rho_4 \\ \rho_2 = \rho_1 \cdot P_1^2 + \rho_3 \cdot P_3^2 \\ \rho_3 = \rho_1 \cdot P_1^3 \\ \rho_4 = \rho_1 \cdot P_1^4 + \rho_3 \cdot P_3^4 \end{cases}$$

Условие нормировки: $\rho_1 + \rho_2 + \rho_3 + \rho_4 = 1.$

Решив систему, получим:

$$\rho_1 = \frac{1}{P_1^3 + 2}; \quad \rho_2 = \frac{P_1^3 \cdot P_3^2 + P_1^2}{P_1^3 + 2}; \quad \rho_3 = \frac{P_1^3}{P_1^3 + 2}; \quad \rho_4 = -\frac{P_1^3 \cdot P_3^2 + P_1^2 - 1}{P_1^3 + 2}.$$

Для нахождения искомой функции распределения воспользуемся методом траекторий [47, 60]. С помощью данного метода, определим все траектории в подмножестве E_- , их вероятности и время пребывания системы на этих траекториях.

Траектории будут иметь вид:

$$T_1 = \{S_3 S_2\}; \quad T_2 = \{S_3 S_4\}; \quad T_3 = \{S_2\}.$$

Вероятности траекторий:

$$P_T^1 = P_3^2; \quad P_T^2 = P_3^4.$$

Определим время пребывания системы в состояниях с учетом повторных попаданий, для чего сначала определим вероятности включения состояний в траектории:

$$P_S^1 = P_T^1; \quad P_S^2 = P_T^1 + P_T^2; \quad P_S^3 = P_T^2.$$

Далее, найдем коэффициенты увеличения времени пребывания системы в состояниях за счет повторных попаданий:

$$c_3 = \frac{\rho_3}{P_S^2 \cdot \rho_1}; \quad c_4 = \frac{\rho_4}{P_S^3 \cdot \rho_1}.$$

Определим плотности распределения времен пребывания системы в состояниях за счет повторных попаданий. В области изображений по Лапласу эти плотности имеют вид:

$$f_3^\theta(s) = \frac{f_3(t)}{c_1 - (c_1 - 1) \cdot f_3(t)}; \quad f_4^\theta(s) = \frac{f_4(t)}{c_2 - (c_2 - 1) \cdot f_4(t)},$$

где $f_n^\theta(s)$ – изображение плотности распределения $f_n(t)$ времени пребывания системы в состоянии n .

Плотности распределения времени пребывания системы на траекториях:

$$f_T^1(s) = f_3^\theta(s); \quad f_T^2(s) = f_3^\theta(s) * f_4^\theta(s),$$

где $*$ – знак операции свертки.

Для нахождения функции распределения $f_-(s)$ с использованием преобразований Лапласа необходимо осуществить переход в комплексную область. Оба слагаемых представляют собой сумму двух бесконечных сходящихся рядов, которые в пределе дают следующее выражение:

$$f_-(s) = f_T^1(s) \cdot P_T^1 + f_T^2(s) \cdot P_T^2.$$

Искомую функцию распределения получаем, произведя переход из области изображений в область оригиналов.

Исходными данными для моделирования служат функции распределения $R_1(t)$, $R_2(t)$, $R_3(t)$, $R_4(t)$, $G_1(t)$; которым соответствует обобщенный закон Эрланга второго порядка с параметрами λ_1, λ_2 ; λ_3, λ_4 ; λ_5, λ_6 ; λ_7, λ_8 ; λ_9, λ_{10} соответственно с учетом зависимостей:

$$f_1(t) = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot (e^{-\lambda_1 \cdot t} \cdot e^{-\lambda_2 \cdot t})}{\lambda_2 - \lambda_1}, \quad f_2(t) = \frac{\lambda_3 \cdot \lambda_4 \cdot (e^{-\lambda_3 \cdot t} \cdot e^{-\lambda_4 \cdot t})}{\lambda_4 - \lambda_3},$$

$$f_3(t) = \frac{\lambda_5 \cdot \lambda_6 \cdot (e^{-\lambda_5 \cdot t} \cdot e^{-\lambda_6 \cdot t})}{\lambda_6 - \lambda_5}, \quad f_4(t) = \frac{\lambda_7 \cdot \lambda_8 \cdot (e^{-\lambda_7 \cdot t} \cdot e^{-\lambda_8 \cdot t})}{\lambda_8 - \lambda_7}, \quad g_1(t) = \frac{\lambda_9 \cdot \lambda_{10} \cdot (e^{-\lambda_9 \cdot t} \cdot e^{-\lambda_{10} \cdot t})}{\lambda_{10} - \lambda_9},$$

где $\lambda_1 = 2$; $\lambda_2 = 0,05$; $\lambda_3 = 0,7$; $\lambda_4 = 0,4$; $\lambda_5 = 0,5$; $\lambda_6 = 0,35$; $\lambda_7 = 0,7$; $\lambda_8 = 0,5$; $\lambda_9 = 0,75$; $\lambda_{10} = 0,1$.

Математическое ожидание будет иметь вид [64]:

$$T_- = \frac{\sum_{i \in E_-} m_i \rho_i}{\sum_{k \in K \subset E_+} \sum_{j \in E_-} P_{kj} \rho_i} \quad (2.5.3)$$

На рисунке 2.5.4 представлены искомые функция – $F(t)$ и плотность – $f(t)$ распределения.

Математическое ожидание полученной нами функции распределения составляет 0,990 ч, тогда как, определяемое с помощью выражения (2.5.3) – 0,990 ч. Как видно из полученных данных, математические ожидания совпадают.

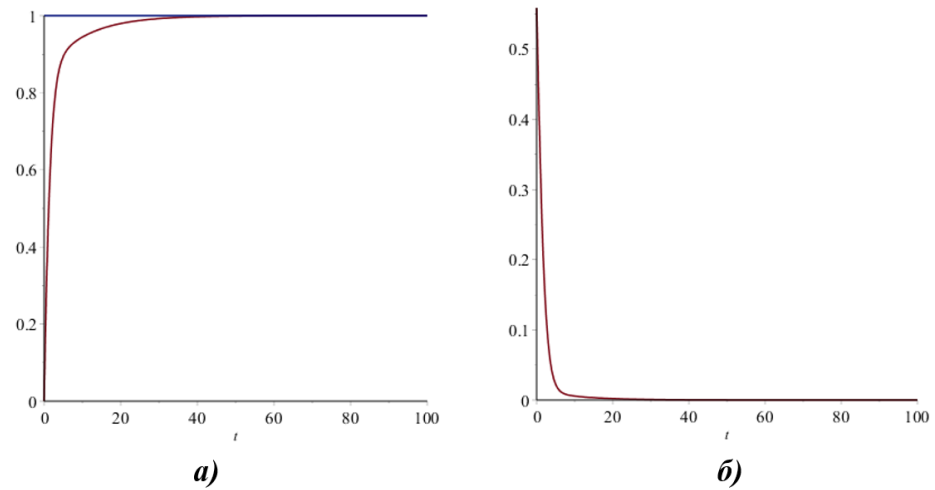


Рисунок 2.5.4 – Вид функции (а) и плотности (б) распределения времени пребывания системы в состоянии E_-

Для верификации данной модели необходимо провести сравнение результатов аналитического и имитационного моделирования [79]. Имитационную модель представим в среде AnyLogic, которая представлена на рисунке 2.5.5.

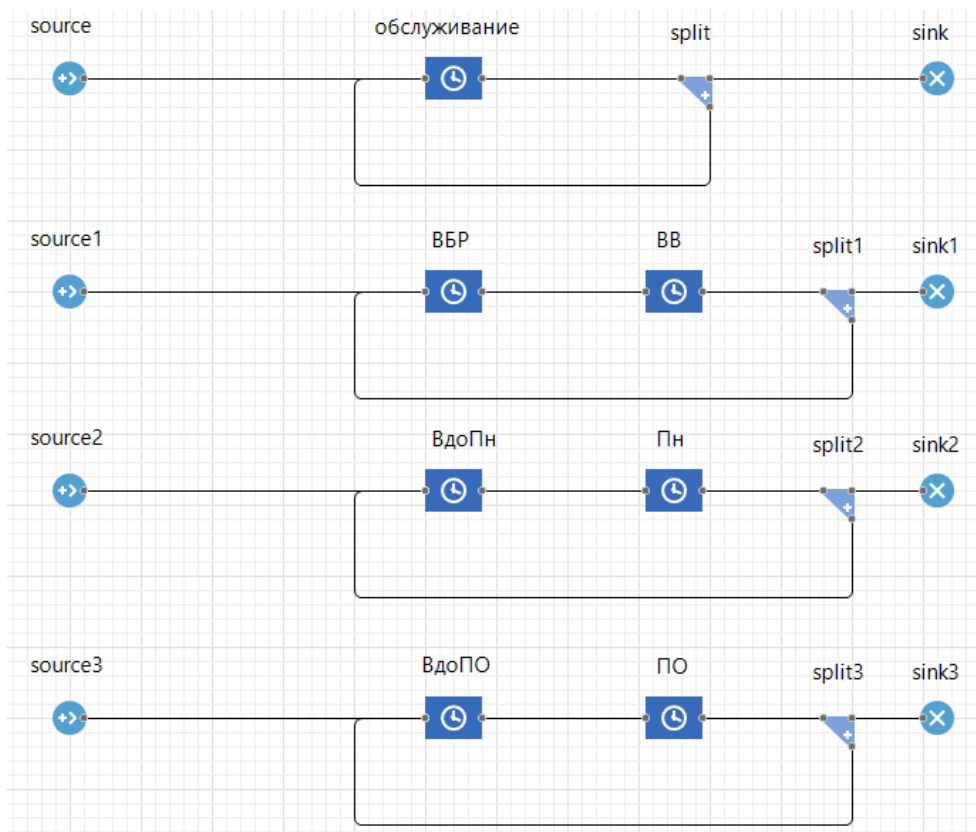


Рисунок 2.5.5 – Модель системы в AnyLogic

Модель функционирует следующим образом. Блок source (source1, source2, source3) генерирует агентов, используется в качестве начальной точки диаграммы процесса, формализующей поток агентов. Блок delay («обслуживание», «ВБР» – время безотказной работы, «ВВ» – время восстановления, «ВдоПН» – время до переналадки, «Пн» – переналадка, «ВдоПО» – время до параметрического отказа, «ПО» – параметрический отказ) задерживает агентов на заданный период времени. Настройка блока delay для «ВВ» представлена на рисунке 2.5.6. Блок sink уничтожает поступивших агентов, используется в качестве конечной точки потока агентов. Когда в блок «ВВ» (восстановление) поступает агент, имитируется состояние отказа системы и сбрасывается «ВдоПН» и «ВдоПО». При поступлении агента в блок «Пн», имитируется переналадка системы и обновляется время безотказной работы. При поступлении агента в блок «ПО», имитируется параметрический отказ системы и, так же, как у состояния переналадки, обновляется время безотказной работы.

BB - Delay

Имя: ☒ Отображать имя ☐ Исключить

Тип задержки: ☒ Определенное время
☐ До вызова функции stopDelay()

Время задержки:

Вместимость:

Максимальная вместимость:

Место агентов:

Специфические Действия

При входе:

При подходе к выходу:

При выходе:

Рисунок 2.5.6 – Настройка блока «delay» для времени восстановления «ВВ»

Результаты аналитического и имитационного моделирования сведены в таблицу 2.5.1.

Таблица 2.5.1 – Результаты аналитического и имитационного моделирования

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Время нахождения системы в состоянии E_- (имит.)	0,989	0,997	1,001	0,993	0,979	1,002	0,998	0,990	0,979	0,996
МО времени нахождения системы в состоянии E_-	0,992 (имит.)									
	0,990 (аналит.)									
Относительная погрешность, %	0,2									

Как видно из таблицы 2.5.1, расхождение полученных математических ожиданий времени нахождения системы в состоянии E_- в аналитической и имитационной моделях не превышает 0,5%, что подтверждает достоверность аналитической модели.

Коэффициент простоя для полумарковской системы будет иметь вид:

$$K_n = \frac{m_-}{m_- + m_+} = 0,299 . \quad (2.5.4)$$

Как видно из выражений (2.5.2) и (2.5.4), коэффициент простоя в полумарковской системе имеет большее значение, чем в марковской, по этой причине будем использовать полумарковскую систему для дальнейших расчетов. Разработанную полумарковскую модель целесообразно использовать для оптимизации процесса формообразования мелкогабаритной внутренней резьбы в глухих глубоких отверстиях, так как она позволяет более полно оценить влияние надежности инструмента в каждом из возможных его состояний на надежность всей технологической системы.

2.6 Надежность приспособления при МРвГГО

Основываясь на расчетных значениях финальных вероятностей из системы уравнений (2.4.1) видно, что приспособление также, как и инструмент, оказывает существенное влияние на надежность станка [78]. В

связи с этим, рассмотрим отдельно граф состояний приспособления, который представлен на рисунке 2.6.1. Состояния системы и ее характеристики сведены в таблицу 2.6.1.

Таблица 2.6.1 – Состояния системы и её характеристики

Состояние системы S_i / Вероятность нахождения системы в i -м состоянии P_i	Интенсивности λ_{ij} , μ_{ij} переходов из состояний S_i
S_1 – безотказная работа / P_1	$S_1 \rightarrow S_2 - \lambda_{12}$; $S_1 \rightarrow S_3 - \lambda_{13}$; $S_1 \rightarrow S_4 - \lambda_{14}$
S_2 – параметрический отказ приспособления / P_2	$S_2 \rightarrow S_3 - \lambda_{23}$; $S_2 \rightarrow S_4 - \lambda_{24}$
S_3 – переналадка приспособления / P_3	$S_3 \rightarrow S_1 - \mu_{31}$
S_4 – отказ функционирования приспособления / P_4	$S_4 \rightarrow S_1 - \mu_{41}$

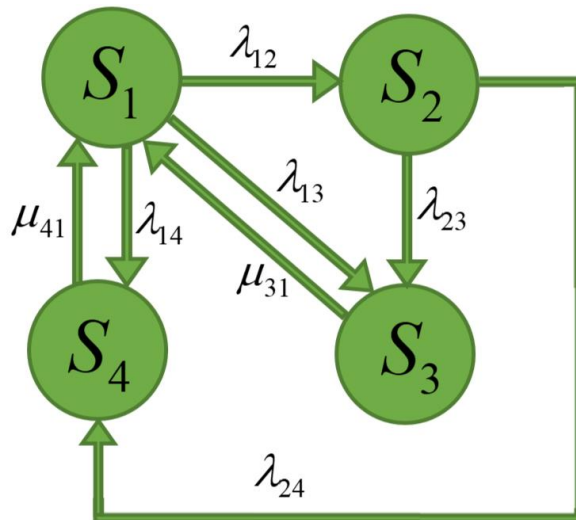


Рисунок 2.6.1 – Размеченный граф состояний приспособления

Уравнения для финальных вероятностей P_1 , P_2 , P_3 , P_4 состояний приспособления S_1, S_2, S_3, S_4 можно представить в виде системы уравнений:

$$\begin{cases} (\lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14}) \cdot P_1 = \mu_{31} \cdot P_3 + \mu_{41} \cdot P_4 \\ (\lambda_{23} + \lambda_{24}) \cdot P_2 = \lambda_{12} \cdot P_1 \\ \mu_{31} \cdot P_3 = \lambda_{13} \cdot P_1 + \lambda_{23} \cdot P_2 \\ \mu_{41} \cdot P_4 = \lambda_{14} \cdot P_1 + \lambda_{24} \cdot P_2 \end{cases} \quad (2.6.1)$$

Решение системы уравнений (2.6.1) с помощью условия нормировки $P_1 + P_2 + P_3 + P_4 = 1$ позволяет получить выражения для P_1, P_2, P_3, P_4 , которые имеют вид:

$$\begin{cases} P_1 = (\mu_{31} \cdot \mu_{41} \cdot (\lambda_{23} + \lambda_{24})) \cdot (\lambda_{12} \cdot \lambda_{23} \cdot \mu_{41} + \lambda_{12} \cdot \lambda_{24} \cdot \mu_{31} + \lambda_{12} \cdot \mu_{31} \cdot \mu_{41} + \lambda_{13} \cdot \lambda_{23} \cdot \mu_{41} + \\ + \lambda_{13} \cdot \lambda_{24} \cdot \mu_{41} + \lambda_{14} \cdot \lambda_{23} \cdot \mu_{31} + \lambda_{14} \cdot \lambda_{24} \cdot \mu_{31} + \lambda_{23} \cdot \mu_{31} \cdot \mu_{41} + \lambda_{24} \cdot \mu_{31} \cdot \mu_{41})^{-1}; \\ P_2 = (\lambda_{12} \cdot \mu_{31} \cdot \mu_{41}) \cdot (\lambda_{12} \cdot \lambda_{23} \cdot \mu_{41} + \lambda_{12} \cdot \lambda_{24} \cdot \mu_{31} + \lambda_{12} \cdot \mu_{31} \cdot \mu_{41} + \lambda_{13} \cdot \lambda_{23} \cdot \mu_{41} + \lambda_{13} \cdot \lambda_{24} \cdot \mu_{41} + \\ + \lambda_{14} \cdot \lambda_{23} \cdot \mu_{31} + \lambda_{14} \cdot \lambda_{24} \cdot \mu_{31} + \lambda_{23} \cdot \mu_{31} \cdot \mu_{41} + \lambda_{24} \cdot \mu_{31} \cdot \mu_{41})^{-1}; \\ P_3 = (\mu_{41} \cdot (\lambda_{12} \cdot \lambda_{23} + \lambda_{13} \cdot \lambda_{23} + \lambda_{13} \cdot \lambda_{24})) \cdot (\lambda_{12} \cdot \lambda_{23} \cdot \mu_{41} + \lambda_{12} \cdot \lambda_{24} \cdot \mu_{31} + \lambda_{12} \cdot \mu_{31} \cdot \mu_{41} + \\ + \lambda_{13} \cdot \lambda_{23} \cdot \mu_{41} + \lambda_{13} \cdot \lambda_{24} \cdot \mu_{41} + \lambda_{14} \cdot \lambda_{23} \cdot \mu_{31} + \lambda_{14} \cdot \lambda_{24} \cdot \mu_{31} + \lambda_{23} \cdot \mu_{31} \cdot \mu_{41} + \lambda_{24} \cdot \mu_{31} \cdot \mu_{41})^{-1}; \\ P_4 = (\mu_{31} \cdot (\lambda_{12} \cdot \lambda_{24} + \lambda_{14} \cdot \lambda_{23} + \lambda_{14} \cdot \lambda_{24})) \cdot (\lambda_{12} \cdot \lambda_{23} \cdot \mu_{41} + \lambda_{12} \cdot \lambda_{24} \cdot \mu_{31} + \lambda_{12} \cdot \mu_{31} \cdot \mu_{41} + \\ + \lambda_{13} \cdot \lambda_{23} \cdot \mu_{41} + \lambda_{13} \cdot \lambda_{24} \cdot \mu_{41} + \lambda_{14} \cdot \lambda_{23} \cdot \mu_{31} + \lambda_{14} \cdot \lambda_{24} \cdot \mu_{31} + \lambda_{23} \cdot \mu_{31} \cdot \mu_{41} + \lambda_{24} \cdot \mu_{31} \cdot \mu_{41})^{-1}. \end{cases}$$

Примем значения интенсивностей с учетом реальных показателей наработок на отказы приспособления, среднего времени между переналадками, а также среднего времени восстановления после отказов, и среднего времени переналадки, ψ^{-1} :

$$\begin{aligned} \lambda_{12} &= 0,005 \cdot 10^{-3}; & \lambda_{13} &= 1,838 \cdot 10^{-3}; & \mu_{31} &= 3,976 \cdot 10^{-3}; & \lambda_{23} &= 2,647 \cdot 10^{-3}; & \lambda_{24} &= 0,367 \cdot 10^{-3}; \\ \lambda_{14} &= 6,129 \cdot 10^{-3}; & \mu_{41} &= 12,256 \cdot 10^{-3} \end{aligned}$$

На основе принятых значений, получим расчетные значения системы уравнений (2.6.1): $P_1 = 0,508$, $P_2 = 0,0009$, $P_3 = 0,235$, $P_4 = 0,254$.

Получив значения финальных вероятностей, необходимо рассчитать коэффициент простоя системы:

$$K_n = P_2 + P_3 + P_4 = 0,489. \quad (2.6.2)$$

Для повышения точности результатов рассмотрим данную систему в полумарковском виде [58, 59, 61]. Граф состояний приспособления представлен на рисунке 2.6.2.

Система включает в себя следующие состояния: S_1 – безотказная работа; S_2 – параметрический отказ (до переналадки x , до отказа y); S_3 – переналадка;

S_4 – отказ функционирования; α_1 – среднее время наработки на отказ; β_1 – среднее время восстановления после отказа функционирования (G1); α_2 – среднее время восстановления после параметрического отказа; α_4 – среднее время до переналадки; β_4 – среднее время переналадки.

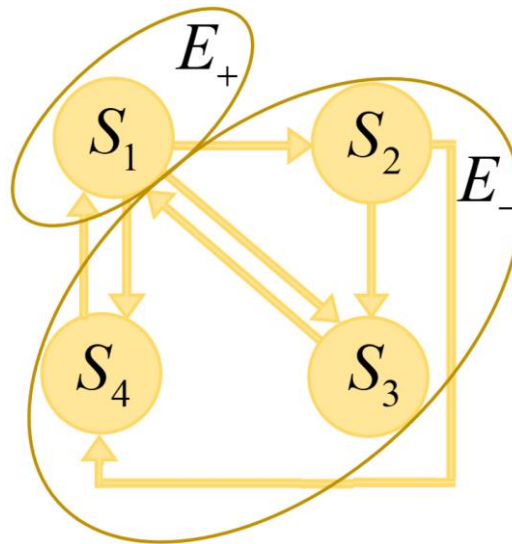


Рисунок 2.6.2 – Граф состояний приспособления в полумарковской системе

Для описания функционирования системы используем полумарковские состояния: $E = \{S_1, S_2, S_3, S_4\}$.

Время пребывания в состояниях будет иметь вид:

$$\theta_1 = \alpha_1 \wedge \alpha_2 \wedge \alpha_4; \theta_3 = x \wedge y; \theta_4 = \beta_1.$$

Для данной системы подмножества работоспособных E_+ и неработоспособных E_- состояний имеют вид:

$$E_+ = \{S_1\}; E_- = \{S_2, S_3, S_4\}.$$

Требуется произвести укрупнение системы, то есть перейти от системы с непрерывным фазовым пространством состояний к системе с дискретными состояниями. В таком случае непрерывные компоненты будут равны:

$$x = \{\alpha_4 - \alpha_2\}^+; \quad y = \{\alpha_1 - \alpha_2\}^+.$$

Отсюда функции распределения имеют вид [63, 64]:

$$\bar{R}_x(t) = \frac{\int_0^\infty [R_4(t+y) - R_4(t)]r_2(t)dy}{\int_0^\infty [1 - R_4(t)]r_2(t)dt}; \quad \bar{R}_y(t) = \frac{\int_0^\infty [R_1(t+y) - R_1(t)]r_2(t)dy}{\int_0^\infty [1 - R_1(t)]r_2(t)dt}.$$

Определим вероятности переходов системы:

$$P_1^2 = \int_0^\infty r_2(t)\bar{R}_1(t)\bar{R}_4(t)dt; \quad P_1^3 = \int_0^\infty r_4(t)\bar{R}_1(t)\bar{R}_2(t)dt; \quad P_1^4 = \int_0^\infty r_1(t)\bar{R}_2(t)\bar{R}_4(t)dt :$$

$$P_2^3 = \int_0^\infty r_x(t)\bar{R}_y(t)dt; \quad P_2^4 = \int_0^\infty r_y(t)\bar{R}_x(t)dt.$$

Найдем функции распределения времени пребывания системы в состояниях:

$$F_1(t) = 1 - \bar{R}_1(t) \cdot \bar{R}_2(t) \cdot \bar{R}_4(t); \quad F_2(t) = 1 - \bar{R}_x(t) \cdot \bar{R}_y(t); \quad F_4(t) = G_1(t).$$

На рисунке 2.6.3 представлен график функций распределения времени пребывания системы в состояниях.

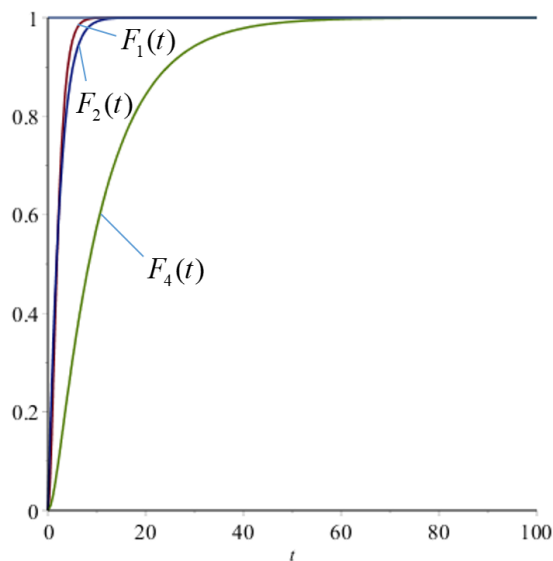


Рисунок 2.6.3 – Функции распределения времени пребывания в состояниях

Для получения искоемых характеристик находится стационарное распределение вложенной цепи Маркова (ВЦМ). Составим систему уравнений:

$$\begin{cases} \rho_1 = \rho_3 + \rho_4 \\ \rho_2 = \rho_1 \cdot P_1^2 \\ \rho_3 = \rho_1 \cdot P_1^3 + \rho_2 \cdot P_2^3 \\ \rho_4 = \rho_1 \cdot P_1^4 + \rho_2 \cdot P_2^4 \end{cases}$$

Условие нормировки:

$$\rho_1 + \rho_2 + \rho_3 + \rho_4 = 1.$$

Решив систему, получим:

$$\rho_1 = \frac{1}{P_1^2 + 2}; \quad \rho_2 = \frac{P_1^2}{P_1^2 + 2};$$

$$\rho_3 = \frac{P_1^2 \cdot P_2^3 + P_1^3}{P_1^2 + 2}; \quad \rho_4 = -\frac{P_1^2 \cdot P_2^3 + P_1^3 - 1}{P_1^2 + 2}.$$

Для нахождения искомой функции распределения воспользуемся методом траекторий [47, 60]. Используя метод траекторий, определим все траектории в подмножестве E_- , их вероятности и время пребывания системы на этих траекториях.

Траектории будут иметь вид:

$$T_1 = \{S_2 S_3\}; \quad T_2 = \{S_2 S_4\}; \quad T_3 = \{S_3\}.$$

Вероятности траекторий:

$$P_T^1 = P_2^3; \quad P_T^2 = P_2^4.$$

Определим времена пребывания системы в состояниях с учетом повторных попаданий, для чего сначала определим вероятности включения состояний в траектории:

$$P_S^1 = P_T^1; \quad P_S^2 = P_T^1 + P_T^2; \quad P_S^3 = P_T^2.$$

Далее, найдем коэффициенты увеличения времени пребывания системы в состояниях за счет повторных попаданий:

$$c_2 = \frac{\rho_2}{P_s^2 \cdot \rho_1}; \quad c_4 = \frac{\rho_4}{P_s^3 \cdot \rho_1}.$$

Определим плотности распределения времен пребывания системы в состояниях за счет повторных попаданий. В области изображений по Лапласу эти плотности имеют вид:

$$f_2^\theta(s) = \frac{f_2(t)}{c_2 - (c_2 - 1) \cdot f_2(t)}; \quad f_4^\theta(s) = \frac{f_4(t)}{c_4 - (c_4 - 1) \cdot f_4(t)},$$

где $f_n^\theta(s)$ – изображение плотности распределения $f_n(t)$ времени пребывания системы в состоянии n .

Плотности распределения времен пребывания системы на траекториях:

$$f_T^1(s) = f_2^\theta(s); \quad f_T^2(s) = f_2^\theta(s) * f_4^\theta(s),$$

где $*$ – знак операции свертки.

Для нахождения функции распределения $f(s)$ с использованием преобразований Лапласа необходимо осуществить переход в комплексную область. Оба слагаемых представляют собой сумму двух бесконечных сходящихся рядов, которые в пределе дают следующее выражение:

$$f_-(s) = f_T^1 \cdot P_T^1 + f_T^2 \cdot P_T^2.$$

Искомую функцию распределения получаем, произведя переход из области изображений в область оригиналов.

Исходными данными для моделирования служат функции распределения $R_1(t)$, $R_2(t)$, $R_3(t)$, $R_4(t)$, $G_1(t)$; которым соответствует обобщенный закон Эрланга второго порядка с параметрами λ_1, λ_2 ; λ_3, λ_4 ; λ_5, λ_6 ; λ_7, λ_8 ; λ_9, λ_{10} соответственно с учетом зависимостей:

$$f_1(t) = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot (e^{-\lambda_1 t} \cdot e^{-\lambda_2 t})}{\lambda_2 - \lambda_1}, \quad f_2(t) = \frac{\lambda_3 \cdot \lambda_4 \cdot (e^{-\lambda_3 t} \cdot e^{-\lambda_4 t})}{\lambda_4 - \lambda_3},$$

$$f_3(t) = \frac{\lambda_5 \cdot \lambda_6 \cdot (e^{-\lambda_5 \cdot t} \cdot e^{-\lambda_6 \cdot t})}{\lambda_6 - \lambda_5}, \quad f_4(t) = \frac{\lambda_7 \cdot \lambda_8 \cdot (e^{-\lambda_7 \cdot t} \cdot e^{-\lambda_8 \cdot t})}{\lambda_8 - \lambda_7}, \quad g_1(t) = \frac{\lambda_9 \cdot \lambda_{10} \cdot (e^{-\lambda_9 \cdot t} \cdot e^{-\lambda_{10} \cdot t})}{\lambda_{10} - \lambda_9},$$

где $\lambda_1 = 2$; $\lambda_2 = 0,05$; $\lambda_3 = 0,5$; $\lambda_4 = 0,35$; $\lambda_5 = 0,6$; $\lambda_6 = 0,45$; $\lambda_7 = 0,7$; $\lambda_8 = 0,5$; $\lambda_9 = 0,75$; $\lambda_{10} = 0,1$.

Математическое ожидание будет иметь вид [64]:

$$T_- = \frac{\sum_{i \in E_-} m_i \rho_i}{\sum_{k \in K \subset E_+} \sum_{j \in E_-} P_{kj} \rho_i} \quad (2.6.3)$$

На рисунке 2.6.4 представлены искомые функция – $F(t)$ и плотность – $f(t)$ распределения.

Математическое ожидание полученной функции распределения составляет 2,252 ч, тогда как определяемое с помощью выражения (2.6.3) – 2,252 ч. Как видно из полученных данных, математические ожидания совпадают. Для верификации данной модели аналогично представленной на рисунке 2.5.5 строим имитационную модель в среде AnyLogic [79], которая показана на рисунке 2.6.5.

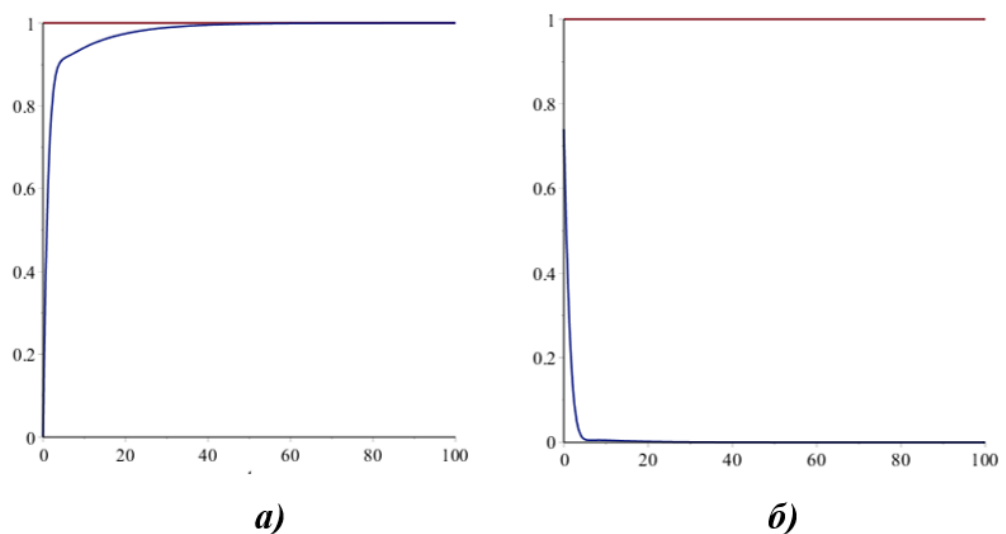


Рис. 2.6.4 – Вид функции (а) и плотности (б) распределения времени пребывания системы в работоспособном состоянии

Как видно из выражений (2.6.2) и (2.6.4), коэффициент простоя в полумарковской системе имеет большее значение, чем в марковской, и как следствие, отражает более точное значение.

Применение разработанной модели будет служить для оптимизации процесса формообразования внутренней резьбы, так как позволяет более полно оценить влияние нахождения приспособления в каждом из возможных состояний его системы.

2.7 Выводы по разделу

1. Разработаны общая модель формирования технологической системы для мелкоразмерной резьбообработки в глухих глубоких отверстиях, алгоритм обеспечения точности МРвГГО и структурная схема процесса МРвГГО.

2. Произведен морфологический анализ структуры технологической системы мелкоразмерной резьбообработки в глухих глубоких отверстиях. Морфологический анализ позволил синтезировать из сформированного множества вариантов технологических систем для обработки МРвГГО три рациональных структурных варианта.

3. Разработанная математическая модель на основе размеченных графов состояний станка в марковской системе с учетом реальных значений параметров интенсивностей потоков отказов и восстановлений его подсистем подтвердила превалирующее влияние на надежность технологической системы станка таких подсистем, как инструмент (метчик) и приспособление.

4. Разработаны аналитические модели в марковской и в полумарковской системах. Для верификации модели в полумарковской системе создана имитационная модель оценки надежности подсистемы инструмента при помощи сравнения коэффициента простоя. Более точной признана полумарковская модель, которую целесообразно использовать для оптимизации процесса формообразования внутренней резьбы на основе совершенствования цикла обработки, конструкций инструмента и

оборудования, так как она позволяет более точно оценить влияние времени нахождения инструмента в каждом из возможных состояний его подсистемы на надежность и производительность.

5. Аналогичным способом, разработаны марковская, полумарковская и имитационная модели для оценки надежности подсистемы приспособления, позволяющие оптимизировать параметры системы. В данном случае, так же при помощи сравнения коэффициента простоя, более точной признана полумарковская модель.

ГЛАВА 3

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ФОРМООБРАЗОВАНИЯ ВНУТРЕННИХ РЕЗЬБ В ГЛУХИХ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЯХ

3.1 Задачи экспериментальных исследований. Общая методика проведения экспериментов

Основными задачами экспериментального исследования являются:

- выбор технологических элементов для МРвГГО, соответствующих по структуре и параметрам рациональным вариантам, выявленным в процессе морфологического анализа;
- экспериментальное получение данных о динамике изменения крутящих моментов в процессе обработки МРвГГО;
- проверка адекватности теоретической модели нового способа МРвГГО как составляющей технологической системы;
- оценка полученных результатов эксперимента.

Эксперименты были реализованы на технологической базе и оборудовании Инженерного факультета Высшей технологической школы «Севастопольский приборостроительный институт» СевГУ с использованием многооперационного обрабатывающего центра мод. MAXXmill 630 [76] (рисунок 3.1.1).

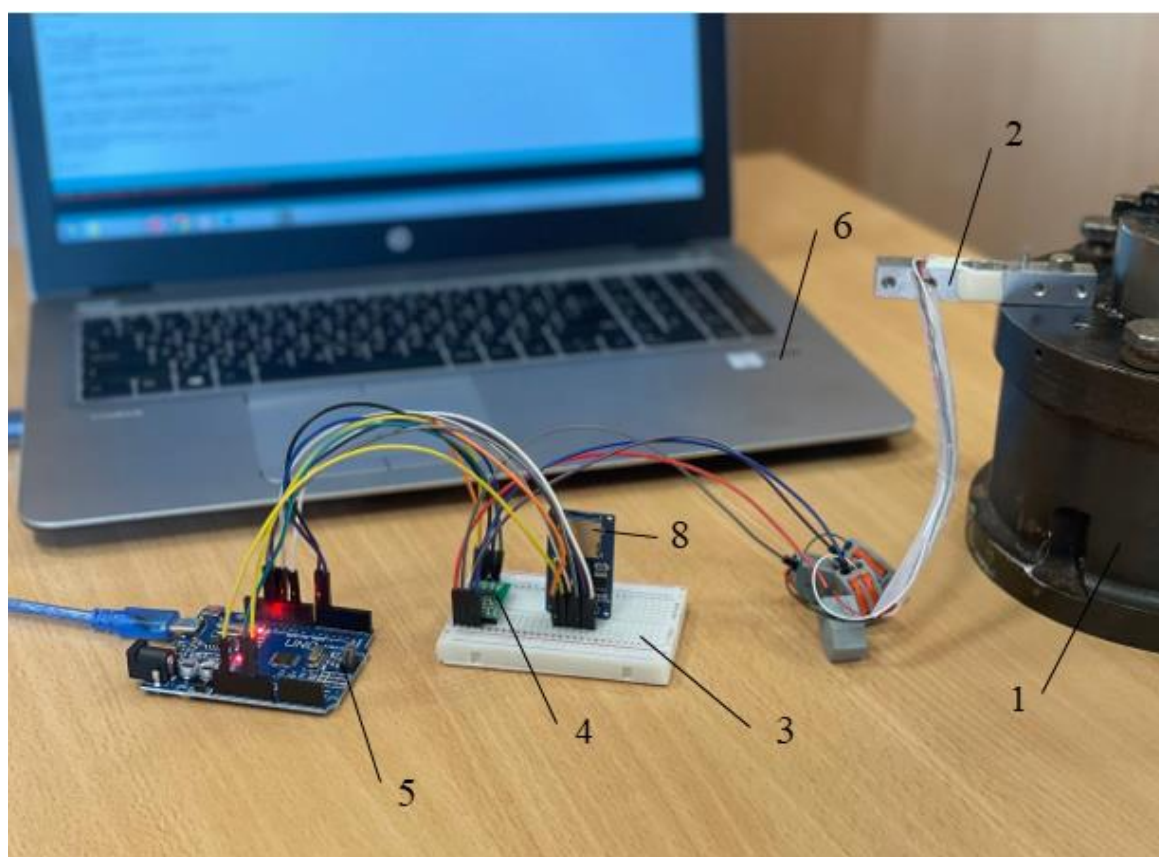
Контроль крутящего момента в процессе резбообработки деталей метчиком осуществлялся с использованием установленной на рабочей поверхности стола специально разработанной конструкции динамометра с поворотной платформой и тензодатчиком [127].

Схема подключения консольного тензодатчика модели FSS1500NSB (HoneyWell) к персональному компьютеру (ПЭВМ) через Arduino UNO (рисунок 3.1.2, а) реализована следующим образом.



Рисунок 3.1.1 – Общий вид экспериментальной установки на станке мод. MAXXmill 630 в процессе проведения исследований

На поворотную платформу динамометра 1 установлен тензодатчик 2, который подключается к расположенному на монтажной плате 3 аналого-цифрового преобразователя (АЦП) 4, подключенного к Arduino UNO 5. Контроллер Arduino UNO подключен и запрограммирован через ПЭВМ 6.



а



б

Рисунок 3.1.2 – Схема подключения тензодатчика к ПЭВМ через Arduino UNO: *а* – общий вид подключения элементов, *б* – общий вид рабочей зоны экспериментальной установки

Также на монтажной плате находится SD модуль 8, который позволяет записывать данные, фиксируемые при обработке резьбы в детали 9, закрепленной в зажимном приспособлении 10 поворотной платформы динамометра 1. Во время резбобработки метчик в отверстии детали 9 создает крутящий момент резания, под действием которого поворотная платформа динамометра 1 посредством закрепленного на ней тензодатчика 2 осуществляет давление на упор 7 (рисунок 3.1.2, б), что обеспечивает возможность в режиме реального времени наблюдать на выводимом в Arduino UNO графике изменения крутящего момента непосредственно в момент обработки. Скетч для реализации данного процесса измерения для программирования Arduino UNO представлен в Приложении А.

Для проведения исследований использовались детали типа втулок из широко используемых в машино- и приборостроении материалов: алюминий АЛ 4 [24], сталь 45 [23] и нержавеющая сталь 34ХНЗМ [27]. С этой целью были изготовлены образцы втулок, эскиз которых представлен на рисунке 3.1.3.

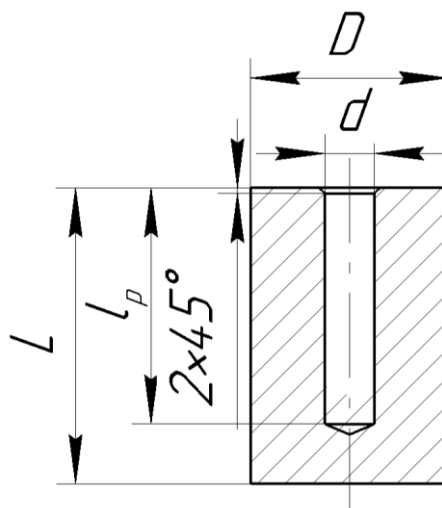


Рисунок 3.1.3 – Образец втулки с глухим глубоким отверстием для обработки резьб М5

Длина втулки определялась в зависимости от длины обрабатываемого отверстия, например, для резьб М5 длина образца рассчитывалась по зависимости:

$$L = l_p + l_{з.к.} + k ,$$

где l_p – длина обрабатываемой резьбы (при обработке глухих отверстий – $3d$ и $4d$); $l_{з.к.}$ – длина заборного конуса метчика; k – недовод резьбы в глухом отверстии ($2...3$ мм).

Выбор рациональных режимов резания осуществлялся на основе существующих рекомендаций из справочной литературы [115]. Полученные данные по глубине резания – $H = 0,87P(мм)$ для резьбы М5х0,8 и скорости резания выбираемой в зависимости от обрабатываемого материала и вида инструмента, представлены в таблице 3.1.1.

Таблица 3.1.1 – Режимы резания

Материал	Подача, мм/об	Глубина резания, мм	Скорость, м/мин
АЛ 4	0,8	0,696	7,850
Сталь 45			7,458
34ХНЗМ			7,065

Объекты исследования и контролируемые параметры представлены в таблице 3.1.2. Контроль диаметров производили калибр-пробками.

Для обработки резьб диапазон исследуемых скоростей определяли по существующим рекомендациям [32, 93, 111, 123] с учетом скоростных характеристик оборудования.

Для получения резьб в технологических образцах использовали смазывающе-охлаждающие технологические среды, рекомендованные в справочной литературе [48, 57, 123].

Таблица 3.1.2 – Объекты экспериментальных исследований и контролируемые параметры

Исследуемый объект		Параметр	
		Наименование	Обозначение
Метчик	Режущий (структура I_1 , тип T880)	Наружный диаметр	d
		Средний диаметр	d_2
		Внутренний диаметр	d_1
		Предельные отклонения шага резьбы	$\pm \Delta p$
	Деформирующий (структура I_2)	Предельные отклонения половины угла профиля	$\Delta \frac{\alpha}{2}$
		Режуще-деформирующе-режущий (структура I_3)	Величина разрушающего крутящего момента
Заготовка			Диаметр отверстия под резьбообработку
Процесс формообразования резьбы		Величина крутящего момента	$M_{кр}$
		Стойкость метчиков	T
Деталь		Точность по среднему диаметру	D_2
		Шероховатость боковых сторон профиля	Ra
СОТС	Масляные	Величина крутящего момента	$M_{кр}$
	Водосмешиваемые		
	Керосин		

3.2 Требования к инструментам для формообразования мелкоразмерных резьб в глухих глубоких отверстиях

Выполненный в первой и второй главах работы анализ показал, что при получении резьб М2...М6 в глухих глубоких отверстиях наиболее целесообразно применять конструкции типов метчиков, в результате морфологического анализа признанные наиболее рациональными. Это режущий метчик структуры I_1 типа Т880 с винтовыми канавками (таблица 1.2.1, рисунок 2.3.5, а), а также варианты структур I_2 , I_3 , разработанные в СевГУ, рабочая часть которых получена пересечением многозаходных резьб с основной резьбой [2, 4, 5] (рисунки 2.3.5, б, в).

Для полной информации и объективной оценки предпочтительного варианта необходим учет стохастических процессов, происходящих в реальных условиях функционирования.

Поскольку выявленные на этапе структурно-компоновочного синтеза с помощью качественного критерия из сформированного множества вариантов для обработки МРвГГО три рациональных варианта (рисунок 2.3.6) отличаются только конструкциями типов метчиков, необходимо провести их испытания на эксплуатационную и технологическую надежность соответственно по определению средних показателей наработки на отказ функционирования и на параметрический отказ. В данном случае – это показатели, соответствующие стойкости инструмента, только в первом случае критерием является поломка рабочей части метчика, а во втором – выкрашивание зубьев заборного участка и в переходной зоне между заборным и калибрующим участками и их затупление. В этой связи отказ функционирования сопровождается достижением $[M_{кр}]$ критического значения, приводящего к поломке рабочей части и остановке процесса. При параметрическом отказе процесс резьбоформирования в глухом глубоком отверстии может продолжаться до определенного значения $M_{кр}$,

приводящему к предельному затуплению зубьев и формированию внутренней резьбы с отклонениями по точности.

С целью обоснования методики рассмотрим возможные варианты выполнения испытаний на надежность. Первый вариант заключается в доведении технологического элемента до отказа по установленным точностным параметрам при выбранных режимах работы (средних, типовых) и специально подготовленном объекте испытания (как правило, с высокими начальными показателями). Длительность таких испытаний достаточно велика, а полученные результаты (значение наработки до отказа) отражают лишь свойства данного технологического элемента в принятых условиях проведения опытов. Второй вариант, при котором предпринимается попытка получить статистический ряд наработок элемента до отказа при различных условиях испытаний, а, следовательно, установить закон $f(t)$, является нереальным из-за его длительности. Третий вариант испытаний заключается в получении закона распределения $f(t)$ за счет сочетания испытаний с прогнозированием хода процесса потери объектом (инструментом) точности в первую очередь в результате износа его рабочих поверхностей. Для этого необходимо иметь аналитические зависимости, связывающие показатели надежности с характеристиками процессов и состояния технологических элементов, а также закономерности их износа. Четвертый вариант испытаний – по экстремальному уровню – основан на том, что для объектов с высокими требованиями к надежности нет необходимости выявлять весь закон распределения $f(x)$. Для решения задач надежности надо исследовать лишь ту его часть в области более низких значений наработки до отказа, которая по площади равна допустимой вероятности отказа $f(x) = 1 - P(t)$ [31, 94, 95]. При испытаниях выявляют не все возможные реализации процесса потери технологическим элементом точности, а лишь те, которые формируют границу области состояний. Именно она определяет условия, при которых в первую очередь возможен отказ при принятом ресурсе работы объекта (инструмента, станка, приспособления, грузочного устройства).

Для оценки выбранных рациональных структур подсистемы «инструмент» (Z) наиболее приемлемым является четвертый вариант испытаний, так как он позволяет за сравнительно малый период времени получить статистический материал по надежности технологических элементов системы. При испытании на надежность по данному методу для исследований устанавливали экстремальные (наиболее тяжелые) условия по следующим факторам:

а) по режимам работы – скорость $V=0,042...0,15$ м/с; нагрузка $M_{кр} = 1,8...3,2 H \cdot м$ (размер резьбы – М5); материалы труднообрабатываемые стали и сплавы – 34ХНЗМ ($\sigma_B = 785...1000 МПа$), сталь 45 ($\sigma_B = 600 МПа$), АЛ4 ($\sigma_B > 230...260 МПа$);

б) по условиям работы – загрязнение поверхности трения, наложение вибраций, наибольшие из допустимых температурных воздействий; смазывающе-охлаждающая жидкость – масляная Акрил МР-3 минеральная (ТУ 0258-019-23693454-2009);

в) по начальному состоянию – точность сборки и наполнения элементов, зазоры в сопряжениях должны иметь наихудшие значения в пределах допуска.

При испытании технологической системы на технологическую и эксплуатационную надежность выделяли элементы, оказывающие основное влияние на точность и работоспособность и которые в первом приближении можно считать независимыми (станок, инструмент, приспособление). На основе принципа аддитивности можно отдельно испытывать эти элементы и их выходные параметры использовать для оценки надежности всей технологической системы для получения МРвГГО.

В процессе выполнения исследований выявили ряд факторов, влияющих на формирование отказов всей технологической системы. Повреждение инструмента (метчика), станка, приспособления, которые сразу проводят к остановке всего технологического оборудования или к недопустимым условиям его работы, являются причинами отказов его функционирования.

Чаще всего эти отказы являются следствием неправильного проектирования, изготовления или эксплуатации технологических систем.

Параметрические отказы не ограничивают возможности функционирования системы, но её дальнейшая эксплуатация приводит к отказам по точности обработки.

Для станка наиболее характерными были параметрические отказы, для инструмента – отказы функционирования, которые проявлялись в виде его поломки. При работе приспособления возникали как параметрические отказы, так и отказы функционирования.

Основные параметры точности обработки, которые необходимо учитывать при проведении экспериментов включают в себя:

а) точность формы поверхности, характеризующаяся в поперечном сечении отклонением от круглости (некруглостью), наиболее характерным видом которого является конусообразность, подрезание первых ниток резьбы;

б) точность взаимного расположения которая характеризуется отклонением от перпендикулярности оси и плоскости, смещением оси от номинального расположения, несимметричностью оси детали;

в) точность выполнения размеров – диаметральных, угловых, по шагу, межосевых расстояний.

Данные виды погрешностей обусловлены погрешностями геометрических параметров станка и приспособления, а также погрешностями, возникающими под действием сил закрепления заготовки. Кроме того, на величину подрезания первых ниток резьбы, на диаметральные, шаговые и угловые размеры отверстия большое влияние оказывает резьбообразующий инструмент – метчик, а также способ его осевого перемещения (принудительно или самозатягиванием).

Точность диаметрального размера резьбовых отверстий определяли резьбовыми калибрами. На его изменение оказывают влияние многие факторы, наиболее значительный из которых – износ зубьев метчика.

Допустимые величины износа зубьев метчиков представлены в таблице 3.2.1.

Допустимая величина износа зубьев по задней поверхности равна:

$$U_z = \frac{d_{\min}^M - D_{\min}}{2}, \quad (3.2.1)$$

где $d_{\min}^M$ – минимальное значение наружного диаметра резьбы метчика, мм; $D_{\min}$ – минимальное значение диаметра впадин резьбы отверстия, мм.

Допустимую величину износа по боковым поверхностям зубьев метчиков в радиальном направлении вычисляли по зависимости:

$$U_{cp} = \frac{d_{\min}^M - D_{2\min}}{2} \quad (3.2.2)$$

где $D_{2\min}$ – минимальное значение среднего диаметра резьбы отверстия, мм.

Таблица 3.2.1 – Допустимые величины износа зубьев метчиков

Раз- мер	Класс точнос- ти	Н1		Н2		Н3		Н4	
		U_z	U_{cp}	U_z	U_{cp}	U_z	U_{cp}	U_z	U_{cp}
		МКМ	МКМ	МКМ	МКМ	МКМ	МКМ	МКМ	МКМ
М5	4Н5Н	30	22						
	5Н6Н	30	22	30	31,5				
	6Н	30	27	30	31,5	30	41	30	31,5
	6G	19	11	19	20,5	19	30	19	20,5
	7Н	30	22	30	31,5	30	41	30	31,5
	7G	19	11	19	20,5	19	30	19	20,5

Превышение предельных величин U_z и U_{np} приводит к параметрическому отказу инструмента, то есть резьбовой профиль обрабатываемого отверстия детали выходит за пределы требуемой точности.

3.3 Требования к способу формообразования рабочей поверхности мелкоразмерных резьб в глухих глубоких отверстиях (МРвГГО)

Исходя из условий обработки и построенной ранее морфологической матрицы (таблица 2.3.1), резьбообразование может осуществляться тремя способами для каждого материала: резьбообразование X_{21} с равномерной подачей, резьбообразование с прерывистой X_{22} подачей и разработанным новым способом резьбообразования на основе программного управления X_{27} с циклической подачей и удалением стружки на каждом цикле.

Задачей нового способа резьбообразования на основе программного управления X_{27} является повышение качества обработки мелкоразмерных резьб метчиком в глухих глубоких отверстиях и обеспечение производительности из-за снижения числа поломок метчика и исключения пакетирования стружки в отверстиях. Эта задача решается предлагаемым режущо-деформирующим метчиком, снабженным зубьями обратного резания и получающим циклические движения ввинчивания и вывинчивания в обрабатываемое отверстие с подачей СОТС на инструмент. Каждый цикл i ввинчивания метчика с шагом резьбы P выполняют на длину рабочего хода $L_i = L_0 + i \cdot \Delta$, где L_0 – величина врезания метчика до начала непосредственной обработки, Δ – величина дополнительного ввинчивания $\Delta = (2...3)P$ метчика на каждом цикле, причем после каждого цикла ввинчивания метчика осуществляется его полное вывинчивание на длину L_{ei} вспомогательного хода, равную длине L_i соответствующего рабочего хода ($L_{ei} = L_i$). При этом на каждом вывинчивании в зоне врезания L_0 очищают рабочую поверхность метчика от остатков стружки посредством установленной на поверхности сопла для подачи СОТС перпендикулярно оси метчика контактирующей с его поверхностью щеточной насадкой. Необходимое количество циклов

ввинчивания определяют по формуле $i = \frac{L}{\Delta}$, исходя из заданной длины обрабатываемой резьбы L отверстия.

Особенности нового способа изготовления мелкоразмерных резьб в глухих глубоких отверстиях с циклической подачей и удалением стружки на каждом цикле поясняются схемами на рисунке 3.3.1, где показана реализация способа и конструкция метчика для формообразования внутренней резьбы, режущие зубья которого чередуются в поперечном сечении с деформирующими и имеются дополнительно зубья обратного резания; на рисунке 3.3.2 – поперечный разрез по А–А метчика на рисунках 3.3.1, 3.3.3 при ввинчивании в отверстие реализуемым способом; на рисунке 3.3.3, а – общий вид устройства для реализации способа на многооперационном станке (условно не показан), по окончании 1-го цикла ввинчивания L_1 и вывинчивания L_{e1} , а также очистки от стружки; на рисунке 3.3.3, б – метчик в отверстии после выполнения 2-го цикла ввинчивания на длину L_2 ; на рисунке 3.3.3, в – метчик после окончания i -х циклов ввинчивания на длину L_i и вывинчивания на длину L_{ei} , а также выполнения очистки от стружки.

На рисунках 3.3.1 – 3.3.3 приняты следующие обозначения: 1 – режущие зубья метчика; 2 – деформирующие зубья; 3 – зубья обратного резания; 4 – рабочая часть метчика; 5 – стружечная канавка, 6 – хвостовик; 7 – глухое глубокое отверстие диаметром d и длиной l для нарезания в нём резьбы $MD \times P$ (M – метрическая резьба, D – наружный диаметр резьбы, P – шаг резьбы); l – длина отверстия; k – недоход резьбы в глухом отверстии; L_0 – длина врезания метчика, т.е. расстояние от исходной точки торца метчика «0» до торца отверстия; L_i – длина рабочего хода i -го цикла ввинчивания метчика, где $i = \frac{L}{\Delta}$, где L – заданная длина обрабатываемой резьбы глухого глубокого отверстия, Δ – величина дополнительного ввинчивания $\Delta = (2...3)P$ на каждом

цикле; $L_{\sigma 1}$ – длина вывинчивания i -го цикла вспомогательного хода метчика; V – направление вращения метчика при ввинчивании; S – осевое перемещение метчика при ввинчивании, согласованное с вращением (за 1 оборот на $S=P$, мм образуемой резьбы); 8 – резьбонарезной патрон; 9 – инструментальный шпиндель многооперационного станка (условно не показан); 10 – сопло для подачи СОТС; 11 – трубка шарнирного типа для подачи СОТС; 12 – кронштейн; 13 – щеточная насадка на поверхности сопла.

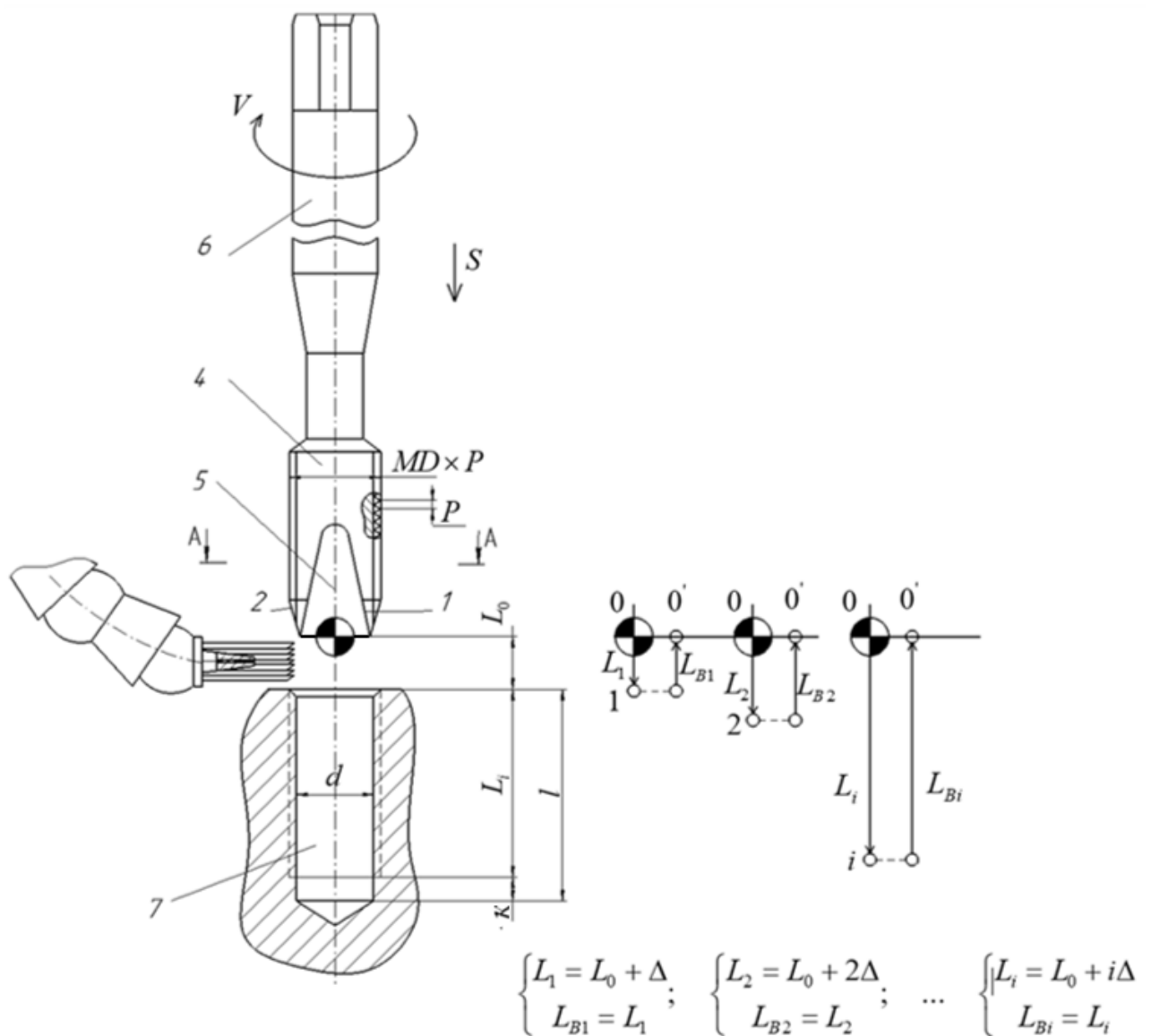


Рисунок 3.3.1 – Схема реализации способа с циклической подачей и удалением стружки на каждом цикле

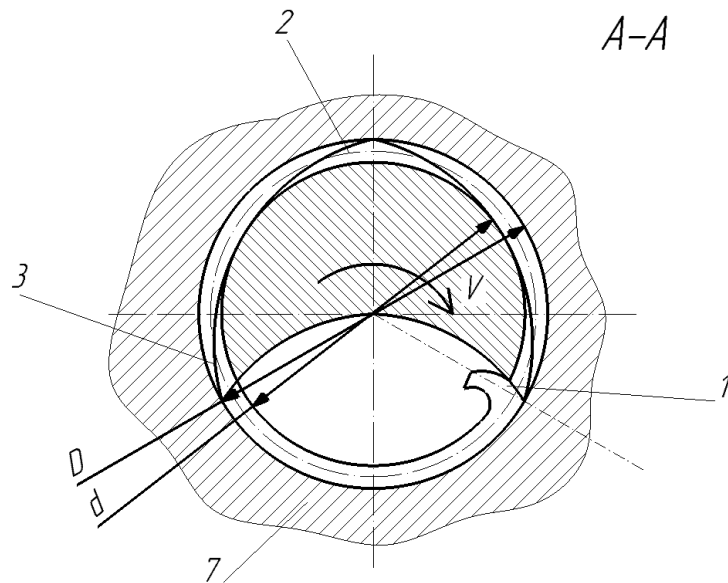


Рисунок 3.3.2 – Поперечный разрез по А–А метчика в зоне обработки

Способ изготовления мелкоразмерных резьб в глухих глубоких отверстиях осуществляется режуще-деформирующим метчиком следующим образом. Метчик хвостовиком 6 устанавливается в резьбонарезной патрон 8 инструментального шпинделя 9 многооперационного станка (условно не показан), в исходной точке соосно перед просверленным предварительно глубоким отверстием 7, диаметром d в детали, закреплённой в зажимном приспособлении указанного станка. Исходная точка инструмента удалена от торца отверстия на длину L_0 врезания метчика. В этой же зоне располагается сопло 10 для подачи СОЖ под давлением в зону резания на поверхность рабочей части 4 метчика по трубке 11 шарнирного типа, закреплённой на кронштейне 12. На поверхности указанного сопла 10 закреплена щёточная насадка с возможностью контакта с рабочей поверхностью 4 метчика в зоне L_0 с целью смывания и удаления стружки с указанной поверхности.

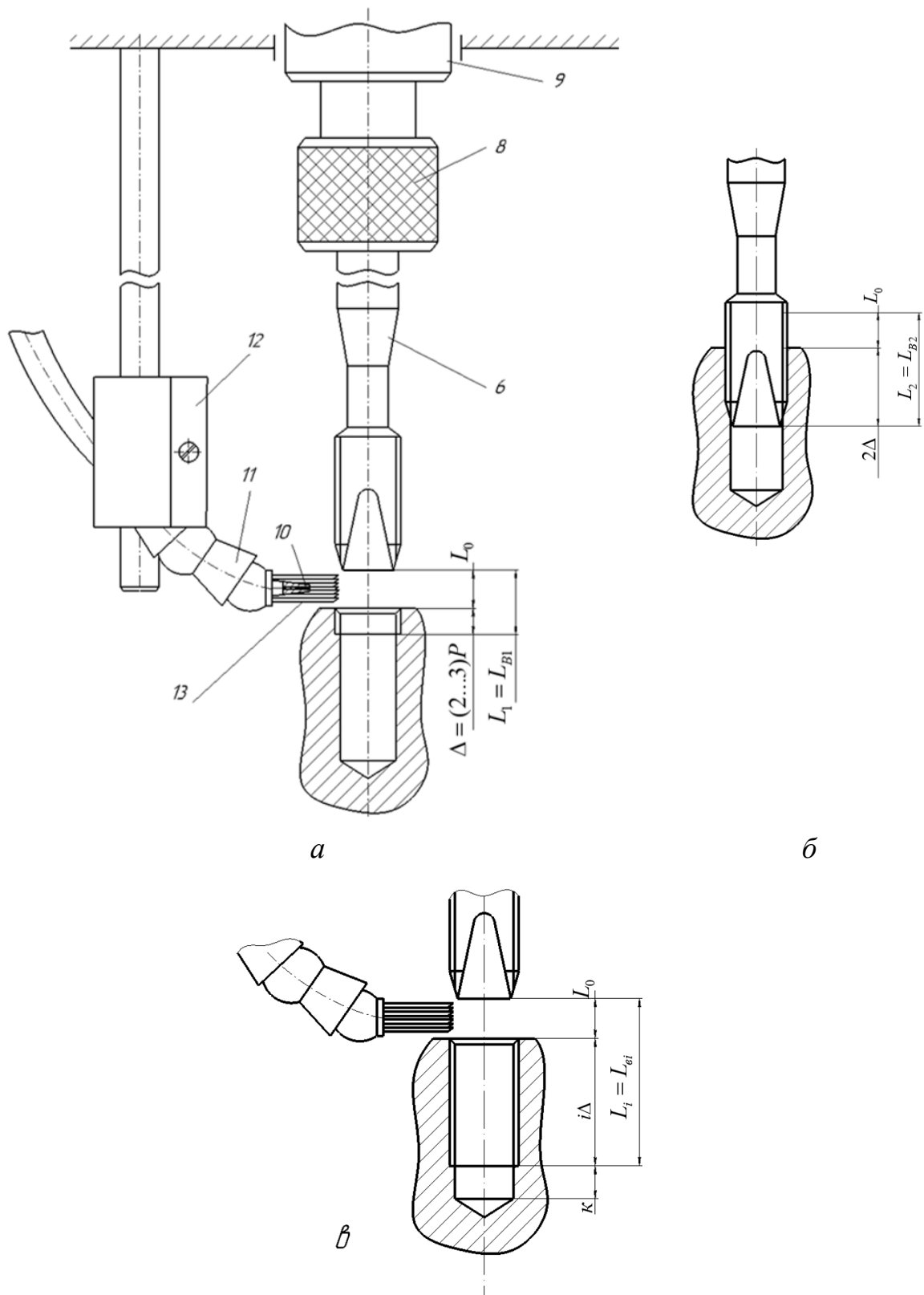


Рисунок 3.3.3 – Схема реализации предлагаемого способа: *a* – общий вид устройства для реализации предлагаемого способа; *б* – метчик в отверстии после выполнения 2-го цикла ввинчивания; *в* – метчик после окончания i -х циклов ввинчивания

Метчик, например, при изготовлении резьбы $M5 \times 0,8$, ($D=5$ мм, $P=0,8$ мм), в отверстии с заданной длиной L обрабатываемой резьбы $L > 3D$ в глубоком отверстии (например, $L=17$ мм) совершает необходимое количество циклов ввинчивания $i = \frac{L}{\Delta}$, где $\Delta = (2...3)P$, т.е.

$$\Delta = (2...3) \cdot 0,8 = 1,6...2,4 \text{ мм}, \quad i = \frac{17}{(1,6...2,4)} = 10,6...7.$$

Принимаем для условия максимальной производительности наибольшую величину $\Delta = 2,4$ мм, получаем количество циклов $i = 8$. Настраиваем систему ЧПУ станка на выполнение полученного расчётом количества циклов ($i = 7$) и выполняем их следующим образом.

Ввинчивая метчик в обрабатываемое отверстие 7 на первом цикле на длину рабочего хода $L_1 = L_0 + \Delta = L_0 + 2,4$ мм, затем полностью вывинчивают его на длину $L_{\epsilon 1} = L_0 + 2,4$ мм вспомогательного хода, при котором срезанная при прямом и обратном ходах элементная стружка смывается струёй СОЖ из сопла 10 и счищается щёточной насадкой 13 с поверхности зубьев 1, 2, 3 рабочей части 4 метчика.

Затем выполняют второй цикл ввинчивания ($i = 2$) метчика на длину рабочего хода $L_2 = L_0 + 2\Delta = L_0 + 2 \cdot 2,4 = L_0 + 4,8$ мм, после чего полностью вывинчивают его на длину $L_{\epsilon 2} = L_0 + 7,2$ мм вспомогательного хода, при этом также очищают рабочую поверхность метчика от остатков стружки посредством струи СОТС и щёточной насадки 13.

Вышеуказанную последовательность действий повторяют до окончания выполнения завершающего цикла ($i = 7$) ввинчивания метчика на длину рабочего хода $L_8 = L_0 + 7\Delta = L_0 + 7 \cdot 2,4 = L_0 + 17$ мм и последующего вывинчивания его на длину $L_{\epsilon 8} = L_0 + 17$ мм вспомогательного хода, также очищая его рабочую поверхность струёй СОЖ и щёточной насадкой.

Процесс программирования (задания цикла) станка представлен на рисунке 3.3.4.

На рисунке 3.3.5 показан общий вид рабочей зоны экспериментальной установки на станке мод. MAXXmill 630 в процессе проведения исследований крутящего момента при реализации разработанного способа при обработке заготовок из алюминия АЛ4, стали 45 и нержавеющей стали 34ХНЗМ.

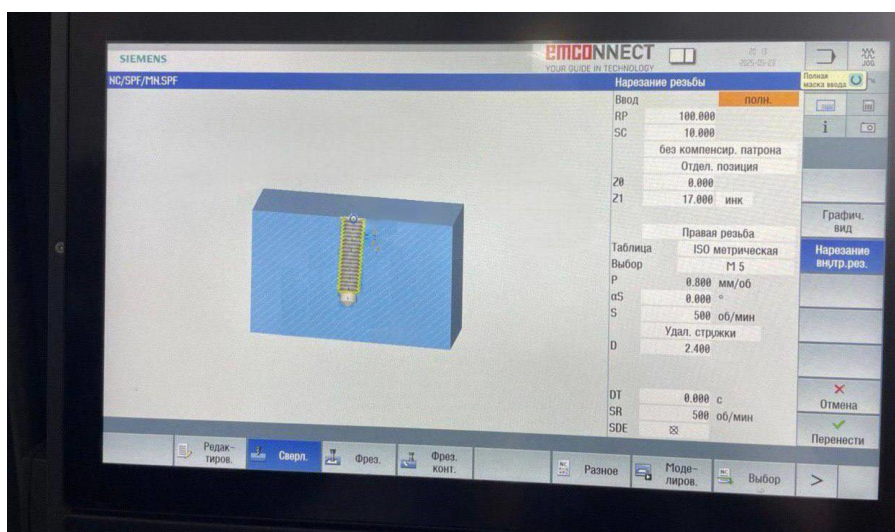


Рисунок 3.3.4 – Задание программы СЧПУ обработки мелкоразмерной глубокой резьбы с циклической подачей и удалением стружки на каждом цикле

Предлагаемый способ, реализуемый режущо-деформирующим метчиком, снабженным зубьями обратного резания, позволяет получать мелкоразмерные резьбы в глухих глубоких отверстиях в том числе на заготовках из труднообрабатываемых материалов с высокой производительностью и качеством.

Исключается заклинивание и поломка мелкоразмерного метчика в глубоком отверстии вследствие удаления стружки, накапливающейся в отверстии, после каждого цикла.



Рисунок 3.3.5 – Общий вид рабочей зоны экспериментальной установки на станке мод. MAXXmill 630 в процессе проведения исследований при реализации разработанного способа

Снижается величина крутящего момента при резьбообработке, т.к. устранены причины заклинивания и затиранья корней стружки в поверхность формируемой резьбы. Обеспечивается зачистка сформированного профиля резьбы при вывинчивании метчика зубьями обратного резания.

Повышается стойкость инструмента и скоростные режимы обработки при реализации циклического способа получения резьб малых диаметров в глухих глубоких отверстиях на многооперационных станках с ЧПУ.

3.4 Результаты экспериментальных исследований эффективности получения мелкоразмерных резьб в глухих глубоких отверстиях (МРвГГО)

3.4.1 Исследование эксплуатационной надежности метчиков с учетом параметров потоков отказов функционирования

Методика исследования эксплуатационной надежности резьбонарезного оборудования с учетом большого числа различных факторов достаточно сложна и трудоемка.

С целью исследования интенсивностей отказов функционирования (λ) и интенсивностей восстановления (μ) сравниваемых вариантов метчиков необходимо провести в лабораторных условиях полный факторный эксперимент типа 2^n для выявления экстремальных условий их функционирования.

Пользуясь таким планированием можно представить исследуемую зависимость $\eta(x)$, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ в виде полинома:

$$\eta(x) = \beta_0 + \sum \beta_i x_i + \sum \beta_{ij} x_i x_j + \sum \beta_{ijk} x_i x_j x_k + \dots, \quad (3.4.1)$$

$$1 \leq i < j \leq n; 1 \leq i < j < k \leq n,$$

где $\{ \beta \}$ – коэффициент уравнения регрессии.

Учитывая, что надежность таких технологических элементов, как метчики определяется в первую очередь прочностью обрабатываемого материала, скоростью резьбонарезания и диаметром отверстия, рассмотрим задачу по определению зависимости стойкости метчиков от перечисленных факторов: прочности обрабатываемого материала $\sigma(x_1)$, скорости резьбообработки $V(x_2)$ и диаметра отверстия $d(x_3)$, то есть:

$$Y = T'_H = f(x_1, x_2, x_3). \quad (3.4.2)$$

Для испытаний брали трехгранные режущие метчики (I_1), пластически деформирующие метчики (I_2) и режуще-деформирующие метчики (I_3), изготовленные из стали Р9К5 (табл. 3.1.2) с твердостью рабочей части HRC 62...65. Максимальная прочность обрабатываемого материала (сталь 34ХН3М) принята равной $\sigma_B = 10^{-3} \text{ Н/м}^2$, минимальная $\sigma_B = 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ Н/м}^2$ (АЛ4). Скорость резцообработки изменяли от 0,042 до 0,15 м/с. Диаметры отверстия под резьбу М5 изменяли для ПДМ в диапазоне от 3,30 до 3,50 мм. Значения остальных параметров принимали постоянными. Условия планирования эксперимента с заданными границами, уровнями и шагами варьирования независимых переменных X_1 , X_2 , X_3 в натуральном кодированном виде представлены в таблице 3.4.1. План эксперимента (матрица планирования) приведена в таблице 3.4.2 (левая часть), где показаны уровни значений параметров, которые имели метчики в данной точке факторного пространства.

Обрабатывали глухие глубокие резьбовые отверстия размером М5 в заготовках из сталей 45, 34ХНМЗ и алюминиевого сплава АЛ4. В качестве смазывающе-охлаждающего технологического средства (СОТС) использовали Акрил МР-3 (ТУ 0258-019-23693454-2009). Средний и внутренний диаметры обработанной резьбы контролировали гладкими и резьбовыми калибрами.

Таблица 3.4.1 – Условия планирования экспериментальных исследований метчиков на эксплуатационную надежность

Условия	$\sigma(x_1)$		$V(x_2)$		$d(x_3)$	
	Н/м ²	код	м/с	код	мм	код
Уровень:						
Верхний	10^{-3}	+1	0,150	+1	3,76	+1
Нижний	$0,2 \cdot 10^{-3}$	+1	0,0416	-1	3,62	-1
Основной	$0,6 \cdot 10^{-3}$	0	0,0950	0	3,69	0
Шаг варьирования	$0,4 \cdot 10^{-3}$	-	0,0541	-	0,07	-

Таблица 3.4.2 – Матрица планирования и результаты эксперимента

Планирование			Стойкость инструмента T'_{II} , мин				Оценка дисперсии, S^2_{yu}
X_1	X_2	X_3	Y_{II1}	Y_{II2}	Y_{II3}	$Y = (Y_{II})$	
-	-	-	14,10	14,23	13,70	14,010	0,0763
+	-	-	1,70	1,56	1,84	1,700	0,0196
-	+	-	3,95	4,12	3,80	3,956	0,0256
+	+	-	0,78	0,94	0,66	0,793	0,0197
-	-	+	14,50	14,62	14,45	14,523	0,0076
+	-	+	1,70	1,50	1,88	1,693	0,0361
-	+	+	4,12	3,80	4,25	4,056	0,0536
+	+	+	0,87	0,74	1,05	0,886	0,0242

Для оценки эксплуатационной надежности метчиков определяли их суммарную стойкость, то есть время от начала работы до поломки зубьев рабочей части или стержня метчика. Суммарная стойкость (наработка на отказ) определяется по формуле:

$$T'_{II} = \frac{k_0 h}{n_{ш} P_M}, \quad (3.4.3)$$

где k_0 – количество обработанных резьбовых отверстий; h – глубина отверстия, мм; $n_{ш}$ – частота вращения шпинделя, мин^{-1} ; P_M – шаг резьбы метчика, мм.

В таблице 3.4.2 (правая часть) приведены результаты испытаний ПДМ (соответствующих синтезированным вариантам II_2), когда значения исследуемых параметров обработки (σ, V, d) составили восемь различных комбинаций, указанных в матрице планирования.

В результате дисперсионного анализа результатов эксперимента окончательное искомое уравнение зависимости имеет вид:

$$Y(X) = 2,964 - 6,473X_1 + 4,765X_2 + 3,699X_3. \quad (3.4.4)$$

Для нахождения оптимальных параметров при наличии уравнения 3.4.4 применяли метод крутого восхождения по поверхности отклика (таблица 3.4.3)

Таблица 3.4.3 – Результаты испытаний метчиков на эксплуатационную надежность

Исследуемые факторы	$\sigma_B, H / м^2$	$V, м / с$	$d, мм$	$T, мин$
b_i	-6,473	4,765	3,699	—
$b_i \cdot \Delta$	$-1,3 \cdot 10^{-3}$	0,2581	0,259	—
Шаг, q	$-0,08 \cdot 10^{-3}$	1	0,017	—
Опытные данные	$0,72 \cdot 10^{-3}$ $0,64 \cdot 10^{-3}$	0,1125 0,1291	3,707 3,724	14,632 14,837

В первой строке таблицы 3.4.3 указаны значения коэффициентов уравнения регрессии. Затем вычисляли произведения коэффициентов b_i на интервал варьирования $\Delta(x)$ (вторая строка). Максимальное значение имело произведение $b_i \cdot \Delta(x_2) = 15,486$, которое и было принято за базовое. Для базового фактора X_2 выбран шаг крутого восхождения $q_2 = 1$. Шаг для остальных факторов X_1 и X_3 находили по соотношениям $q_1 = -1,3 \cdot 10^{-3} / 15,486 = -0,08 \cdot 10^{-3}$; $q_3 = 0,259 / 15,486 = 0,017$. Полученные шаги занесены в третью строку. В следующих строках показан процесс восхождения с реализацией опытов.

Из анализа результатов испытаний следует, что стойкость метчиков повышается с уменьшением прочности обрабатываемого материала. Однако дальнейшее уменьшение прочности материала нецелесообразно, так как при значениях $\sigma_B < 0,2 \cdot 10^{-3} H / м^2$ мы выходим за пределы диапазона труднообрабатываемых материалов, что противоречит условиям испытаний на надежность по экстремальному уровню. Поэтому значения параметров, записанные в последней строке, можно считать приемлемыми для результатов

испытаний метчиков: материал 34ХНЗМ ($\sigma_B < 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ Н / м}^2$), $V = 0,1291 \text{ м / с}$, $d = 3,724 \text{ мм}$.

Полученные аналогичным образом (в результате факторного эксперимента) данные для режущих метчиков (I_1) и режуще-деформирующих метчиков (I_3) позволили выявить для них условия проведения испытаний на эксплуатационную надежность. Так, для варианта I_1 выбирали обрабатываемый материал 34ХНЗМ ($\sigma_B < 0,58 \cdot 10^{-3} \text{ Н / м}^2$), $V = 0,07 \text{ м / с}$, $d = 3,24 \text{ мм}$. Для варианта I_3 брали материал АЛ4 ($\sigma_B < 0,26 \cdot 10^{-3} \text{ Н / м}^2$), $V = 0,117 \text{ м / с}$, $d = 3,34 \text{ мм}$.

Исследования наработки на отказ метчиков (T'_H) трех структурных вариантов (I_1, I_2, I_3) производили в течении месяца в лабораторных условиях с учетом параметров обработки и режимов, выбранных для каждой конструкции в процессе факторного эксперимента. Результаты статистического исследования указанных метчиков сведены в таблице 3.4.4, где показаны математические ожидания $M[T'_H]$ дискретных случайных величин времени T'_H между двумя отказами функционирования метчиков.

Дисперсия $D[T'_H]$ при этом отличается от соответствующего математического ожидания на 2,5%, 6% и 11%, что дает возможность утверждать о распределении случайной величины T'_H по закону Пуассона. Для статистического описания процесса возникновения отказа рассчитывали относительные частоты распределения $h(T'_H)$. На основании результатов вычислений строили графики относительных частот распределения для каждого варианта метчиков (рисунок 3.4.1).

Таблица 3.4.4 – Экспериментальные значения времени между отказами функционирования метчиков

Вариант метчика	Математическое ожидание, $M[T'_H]$, мин	Дисперсия, $D[T'_H]$
Режущий – I_1	7,9	8,1
Деформирующий – I_2	14,6	13,7
Режуще-деформирующий – I_3	21,9	19,4

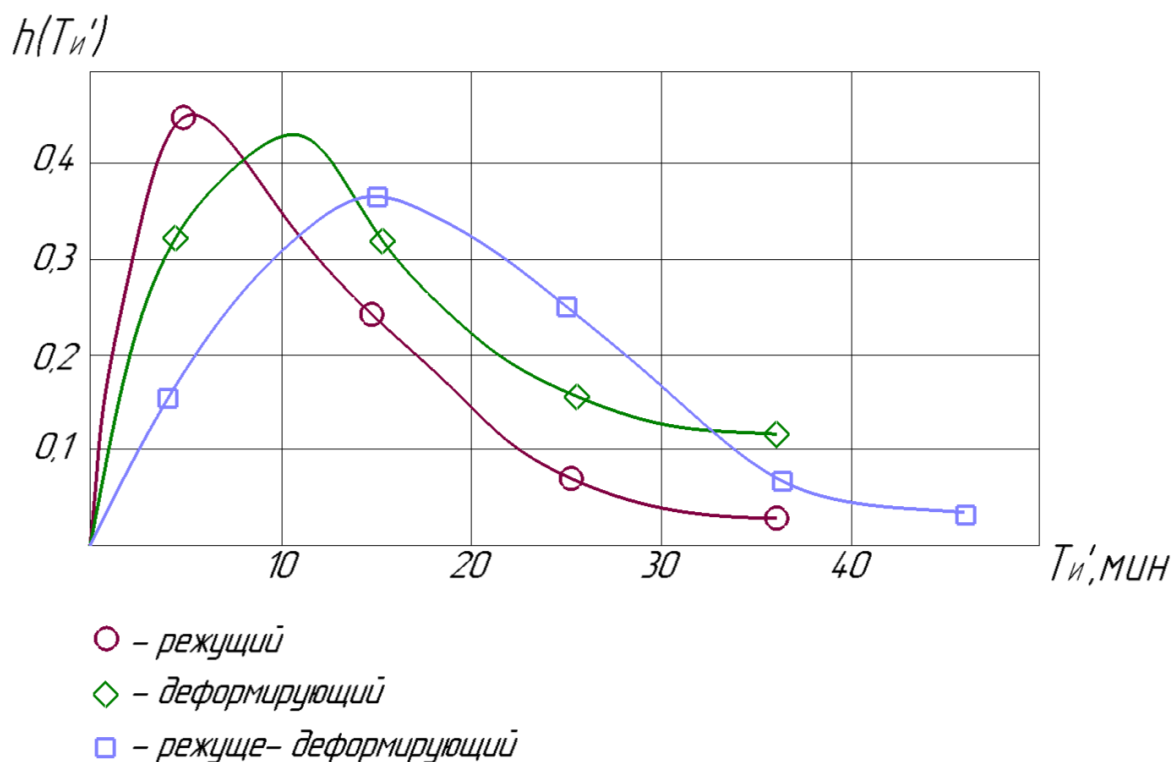


Рисунок 3.4.1 – Относительные частоты распределения времени между отказами функционирования метчиков

Анализ графиков допускает возможность использования гипотезы об экспоненциальном характере распределения времени между двумя отказами функционирования метчиков. Проверка по критерию Бартлетта (таблица 3.4.5) также подтвердила справедливость этой гипотезы. Наиболее частыми причинами отказов функционирования метчиков режущих (I_1) были поломки рабочей части, деформирующих (I_2) – выкрашивание зубьев заборного участка и переходных зубьев между заборным и калибрующим участками.

Режущо-деформирующие метчики (I_3) выходили из строя как по первой, так и по второй причинам примерно в равных соотношениях.

Таблица 3.4.5 – Результаты экспериментальной оценки применимости гипотезы экспоненциального распределения отказов функционирования метчиков

№ п/п	Определяемый параметр		Варианты метчиков		
			I_1	I_2	I_3
1.	Двусторонний критерий	$\chi^2_{0,95}$	73,52	69,12	60,39
		$\chi^2_{0,05}$	118,75	113,15	101,88
2.	Критерий Бартлетта	B_n	98,72	101,19	79,43

Время восстановления каждого технологического элемента после отказа функционирования, являющееся дискретной случайной величиной, обследовали в лабораторных условиях (для метчиков – $T'_{ВИ}$) и в производственных условиях завода «Фиолент».

Среднее время восстановления инструмента $T'_{ВИ}$ после отказа функционирования – это время от момента поломки старого метчика до начала работы нового, установленного на его месте (включая время извлечения остатков старого инструмента из детали и патрона). Экспериментальные значения времени восстановления инструмента ($T'_{ВИ}$) приведены в таблице 3.4.6.

Таблица 3.4.6 – Экспериментальные значения времени восстановления метчиков после отказов функционирования

Параметр	Инструмент		
	I_1	I_2	I_3
Математическое ожидание $M[T'_{ВИ}]$, мин	1,8	2,1	1,9

Проведенные исследования и результаты расчетов интенсивностей потоков отказов и восстановления (таблица 3.4.7) выявили наиболее слабые с точки зрения эксплуатационной надежности инструменты.

Таблица 3.4.7 – Значения интенсивностей потоков отказов функционирования и восстановления после отказов функционирования метчиков

№ п/п	Метчик		Интенсивность	
			отказов λ , мин^{-1}	восстановления μ , мин^{-1}
1	Режущий	I_1	0,1265	0,5555
2	Деформирующий	I_2	0,0684	0,4761
3	Режуще-деформирующий	I_3	0,0456	0,5263

Так, самая высокая интенсивность отказов ($\lambda_1 = 0,1265 \text{ мин}^{-1}$) зафиксирована у режущих метчиков (I_1). При практически одинаковой интенсивности восстановления μ_1 лучшие показатели по надежности ($\lambda_1 = 0,0456 \text{ мин}^{-1}$) имеют режуще-деформирующие метчики (I_3).

Однако, окончательный вывод относительно эффективности тех или иных вариантов без оценки технологической надежности делать преждевременно.

Проведение аналогичных экспериментов по изучению причин возникновения параметрических отказов метчиков, законов распределения их величин поможет дополнить необходимой информацией процесс выбора их рациональных вариантов.

3.4.2 Исследование точностных характеристик внутренних резьб и технологической надежности метчиков с учетом потоков параметрических отказов

Сущность оценки технологической надежности состоит в том, чтобы на основании статистических данных о параметрических отказах элементов получить интенсивности потоков отказов и восстановления каждого из синтезированных вариантов.

Параметрические отказы не ограничивают функционирования технологического элемента, но его дальнейшая эксплуатация приводит к отказам по точности и качеству обработки (интенсивности λ_{01}).

С целью исследования интенсивностей параметрических отказов метчиков (λ_{01}) использовали результаты их факторного эксперимента, проведенного ранее для определения эксплуатационной надежности [18, 77, 78, 79]. На основании этого для каждого из вариантов метчиков (М5) устанавливали следующие условия испытаний:

а) для машинно-ручных метчиков (I_1) – обрабатываемый материал *34ХНЗМ* ($\sigma = 0,58 \cdot 10^{-3} \text{ Н / м}^2$); скорость резания $V = 0,07 \text{ м / с}$; диаметр отверстия $d = 3,24 \text{ мм}$;

б) для деформирующих метчиков (I_2) – обрабатываемый материал *12Х13* ($\sigma = 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ Н / м}^2$); скорость резания $V = 0,13 \text{ м / с}$; диаметр отверстия $d = 3,724 \text{ мм}$;

в) для режуще-деформирующих метчиков (I_3) – обрабатываемый материал *12Х21Н5Т* ($\sigma = 0,7 \cdot 10^{-3} \text{ Н / м}^2$); скорость резания $V = 0,12 \text{ м / с}$; диаметр отверстия $d = 3,34 \text{ мм}$;

К параметрическому отказу метчика приводит повышение предельной величины износа $U_{\text{пр}}$ его зубьев, что в свою очередь снижает точность диаметральных размеров обрабатываемых резьбовых отверстий. Под

показателем T''_{II} (среднее время между двумя параметрическими отказами) понимали среднее время работы метчика от начала его работы до предельного затупления, величины которого рассчитаны и представлены в таблице 3.2.1 [17].

В результате проведенных исследований в лабораторных условиях на экспериментальной установке (рисунки 3.1.1-3.1.2) выявлена общая закономерность увеличения суммарного крутящего момента $M_{кр}$ относительно величины его математического ожидания для каждого из вариантов метчиков (таблица 3.4.8, рисунок 3.4.2). Осциллограммы крутящего момента (рисунок 3.4.3) поясняют изменение величины $M_{кр}$ во время обработки и в период наступления параметрического отказа.

Таблица 3.4.8 – Экспериментальные значения суммарного крутящего момента при исследовании метчиков на технологическую надежность

№ п/п	Математическое ожидание	Вариант метчика		
		I_1	I_2	I_3
1.	Суммарный крутящий момент $M_{кр}, H \cdot м$	1,82	4,51	3,23
2.	Экстремальный крутящий момент $M_{кр.э}, H \cdot м$	2,88	8,10	5,49

Наибольшего численного значения $M_{кр}$ достигает в период максимального контактирования зубьев метчика с обрабатываемым материалом. Глубину отверстия выбирали равной $l > 3d$, то есть $l = 17 мм$. При этом было установлено, что крутящий момент при работе деформирующего метчика ($M_{кр} = 4,51 H \cdot м$) значительно превышает (в 2,5 раза) этот показатель при работе режущих метчиков ($M_{кр} = 1,82 H \cdot м$) и в 1,4 раза – при работе режуще-деформирующих метчиков ($M_{кр} = 3,23 H \cdot м$).

Предельное затупление каждого из вариантов метчиков сопровождалось ростом суммарного крутящего момента $M_{кр}$ до экстремальных значений (

$M_{кр.э}$), которые у вариантов I_1 , I_2 , I_3 превышали величины $M_{кр}$ соответственно в 1,6, 1,8, 1,7 раз. Учитывая также [71] тот факт, что основная доля суммарного крутящего момента (85...90%) расходуется непосредственно на «чистое» резание (формообразование), и только 10...15% – на остальные составляющие (трение боковых сторон профиля, трение стружки о канавки метчика, зубьев о витки резьбы за счет скручивания тела метчика и деформации его сечений; за счет растяжения и сжатия шагов метчика от действия изгибающего момента, приложенного к хвостовику), будем считать основной причиной увеличения $M_{кр}$ до экстремального значения $M_{кр.э}$ затупление зубьев метчика свыше критической величины. Измерение величин износа и наростообразования на установках для контроля метчиков подтвердили это предположения. Так, наиболее характерными видами параметрических отказов машинно-ручных метчиков I_1 были: наростообразование обрабатываемого материала на передних и боковых поверхностях зубьев (рисунок 3.4.4, а); скалывание вершин зубьев (рисунок 3.4.4, б); притупление кромок (рисунок 3.4.4, в); оплавление кромок зубьев рабочей части (рисунок 3.4.4, г).

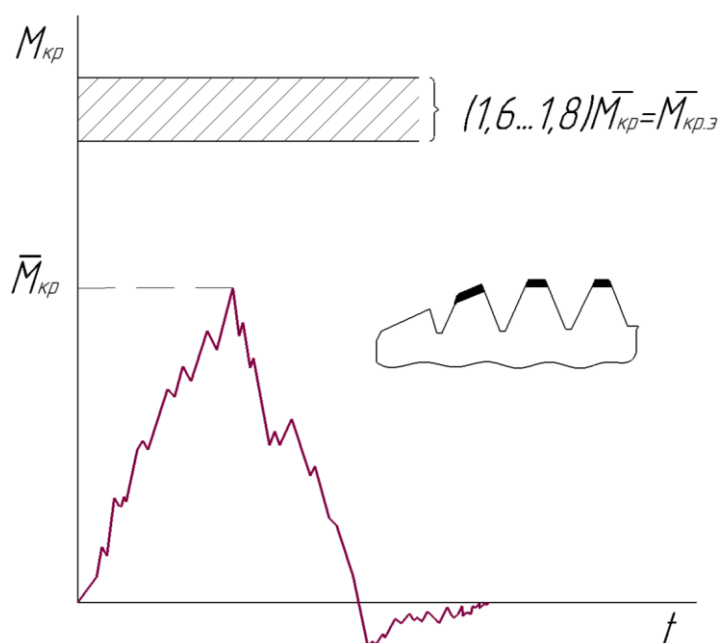


Рисунок 3.4.2 – Изменение величины суммарного $M_{кр}$ во время резьбообработки до наступления параметрического отказа

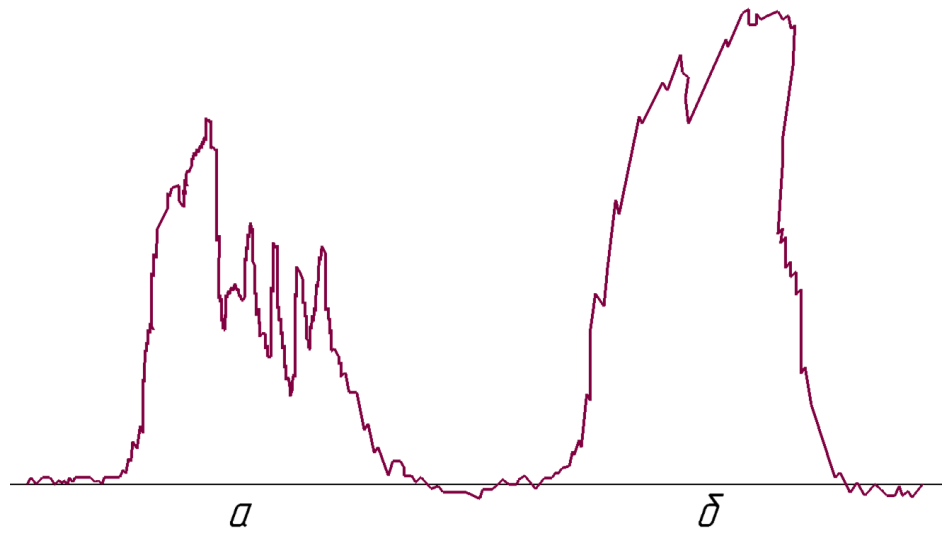


Рисунок 3.4.3 – Осциллограммы записи крутящего момента при работе метчика: *a* – нормальная работа; *б* – параметрический отказ метчика

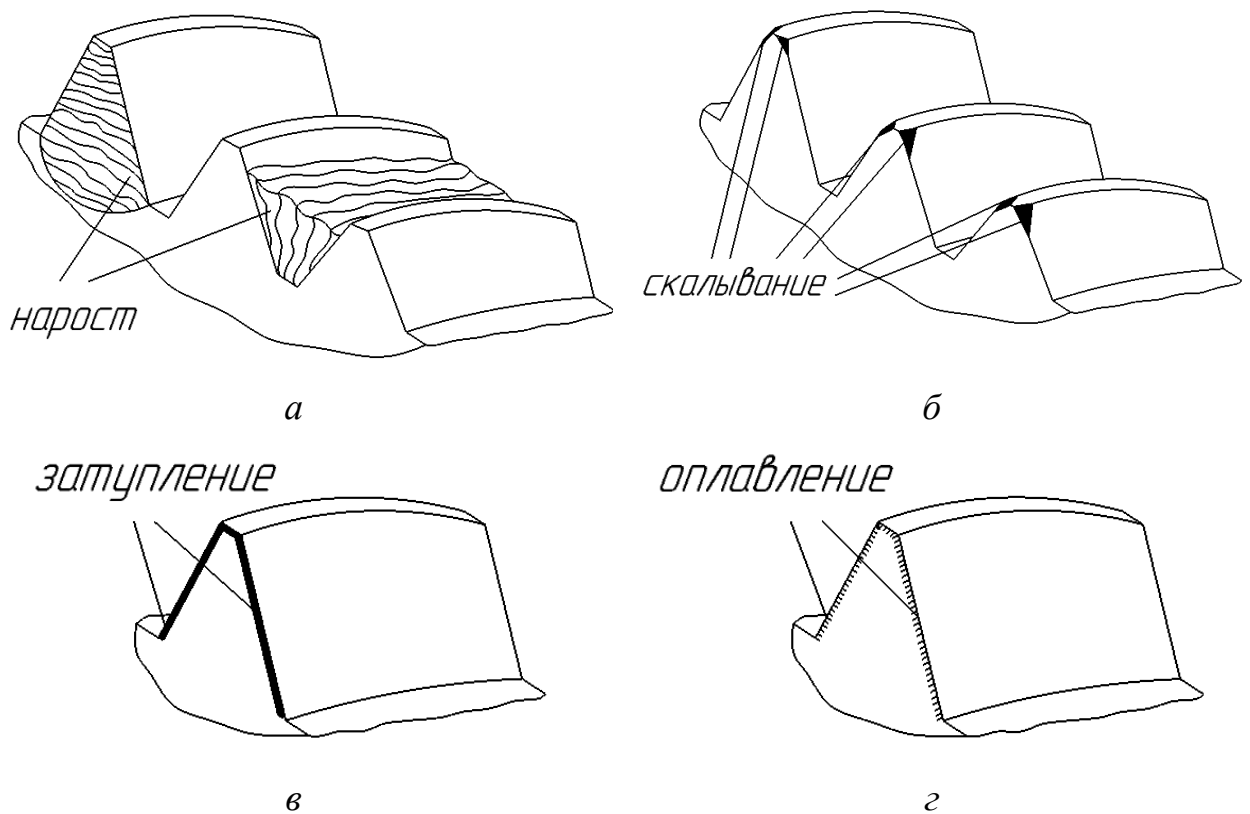


Рисунок 3.4.4 – Наиболее характерные виды параметрических отказов режущих метчиков

Наиболее характерным для деформирующих метчиков (I_2) было явление наростообразования на заборном и калибрующем участках. Величина и форма налипания меняется на одном и том же витке после каждого обработанного отверстия и не является подобием предыдущей.

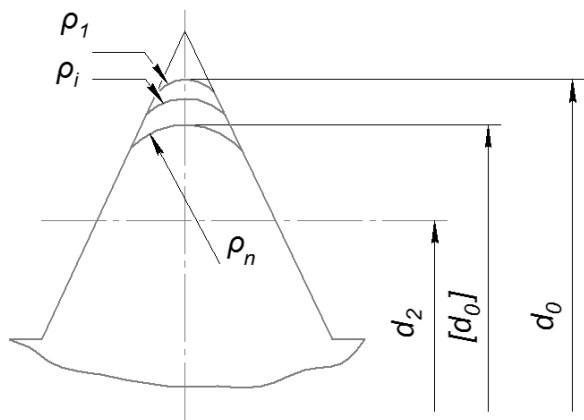


Рисунок 3.4.5 – Схема износа зубьев пластически деформирующего метчика

Износ витков резьбы начинается с увеличения радиусов скругления ρ_1, ρ_i на боковых сторонах профиля витка. По мере работы такого метчика величины радиусов увеличивались до тех пор, пока не соединились (ρ_n). С этого момента начинал уменьшаться наружный диаметр метчика d_0 . В дальнейшем износ протекал по боковым поверхностям и наружному диаметру (рисунок 3.4.5). Для режуще-деформирующих метчиков (I_3) на режущих участках наблюдались скалывание вершин и притупление кромок, а на деформирующих участках – наростообразование и скругление вершин зубьев. При получении резьб, в особенности, в алюминиевых сплавах, имеет место наростообразование обрабатываемого материала на зубьях заборного и переходного участков, что объясняется высокими контактными напряжениями. Вследствие этого увеличиваются размеры образуемых резьб, а затем происходит заклинивание рабочей части метчика в обрабатываемой детали и поломка его.

Шероховатость (Ra) боковых поверхностей профиля резьб, полученных

режущими метчиками, лежит в пределах 20...25 мкм. При получении резьб деформирующими и режуще-деформирующими метчиками шероховатость резьбовых поверхностей снижается до 2...5 мкм.

При получении резьб деформирующими и режуще-деформирующими метчиками исследовалась величина усадки (уменьшение диаметра за счет упругих деформаций). Величина усадки по среднему диаметру в резьбовых отверстиях М5, полученных деформирующими метчиками, лежит в пределах 0,025... 0,045 мм, что согласуется с данными, приведенными в работах [71], при получении резьбы режуще-деформирующими метчиками величина усадки составила 0,010...0,025 мм. Наиболее существенно влияет на величину упругой усадки скорость формирования резьбы. При получении резьб с принудительной подачей величина упругой усадки растет. Однако, это нельзя считать недостатком, так как упругая усадка компенсирует увеличение диаметра резьбовых отверстий вследствие погрешностей обработки.

В результате износа метчика меняется не только номинальный размер его среднего диаметра, но и существенно преобразуется геометрия зубьев рабочей части. Указанные погрешности при дальнейшей работе метчиков прогрессируют. Это в свою очередь вызывает увеличение крутящих моментов и амплитуды колебания и, соответственно, увеличение деформаций кручения метчиков, снижение точности получаемых резьб и увеличение шероховатости.

На рисунке 3.4.6, а показан микрошлиф резьбового отверстия М5, полученного режущим метчиком. На боковых сторонах профиля видны характерные ступени 1, соответствующие механизму образования погрешностей в виде подрезания профиля при формировании внутренних резьб М2...М6 режущими метчиками.

На рисунке 3.4.6, б показан микрошлиф рабочей части профиля в осевой плоскости, проходящей через средний диаметр резьбы, полученной деформирующим метчиком. Боковые стороны профиля 2 криволинейны и имеют кратеры 3 на вершинах профиля резьбы, что подтверждает теоретические предпосылки о механизме искажений профиля резьбы

метчиками М2...М6.

При обработке отверстий М5 в алюминиевых сплавах профиль резьбы, полученной с помощью режуще-деформирующего метчика, соответствует требуемым параметрам, определяемым по ГОСТу [26] (рисунок 3.4.6, в). Профиль такой резьбы не содержит видимых погрешностей, характерных для обработки резьб, полученных режущими или деформирующими метчиками [51]. Для этого использовался электронный микроскоп МЕГЕОН 33102 (к0000033682), широко применяемый в исследованиях, контроле качества на производстве, обеспечивающий 1000-кратное увеличение объекта (рисунок 3.4.6, г).

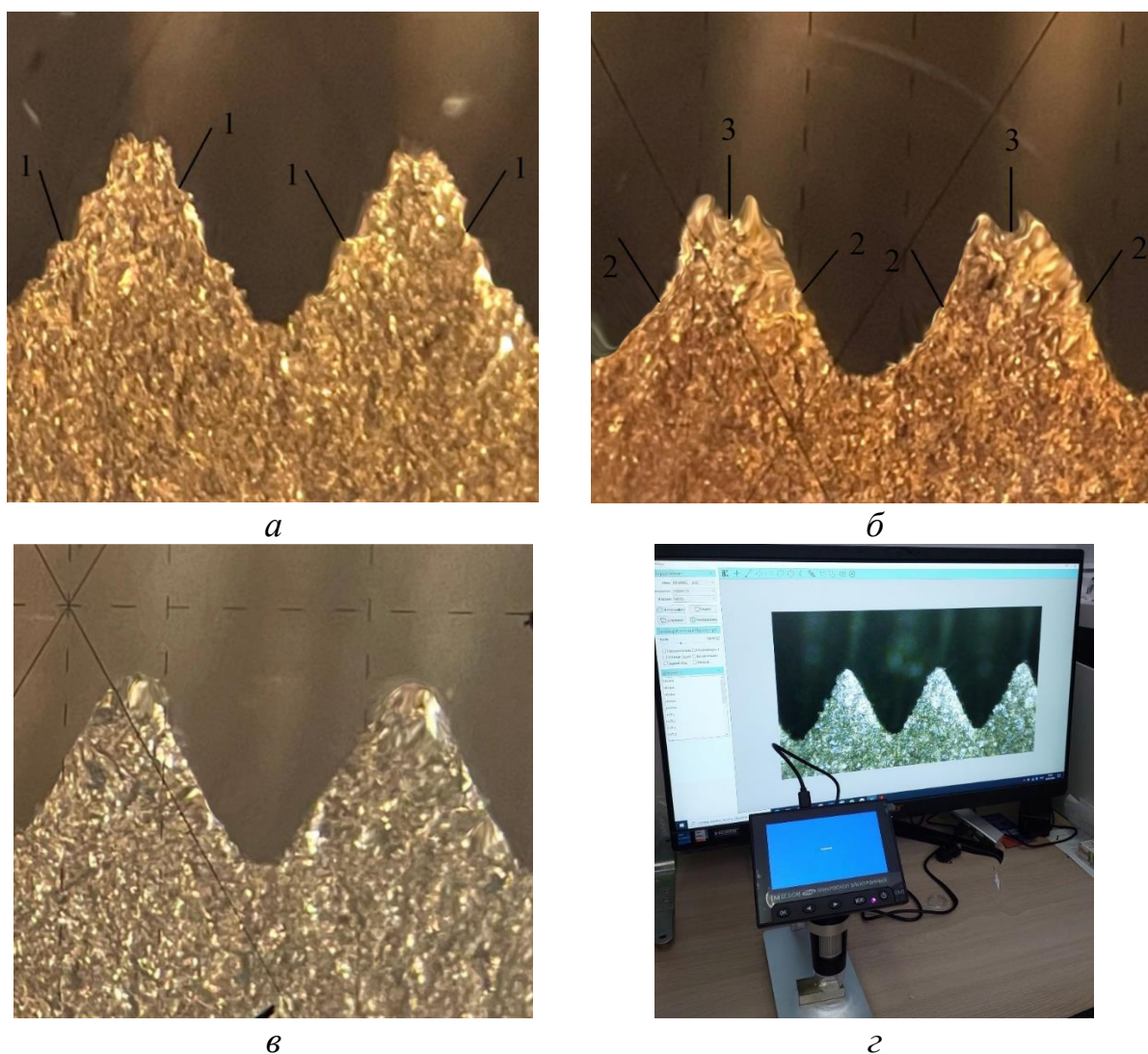


Рисунок 3.4.6 – Микрошлифы профилей резьбы, полученной режущим (а), деформирующим (б) и режуще-деформирующим (в) метчиками, наблюдаемые с помощью цифрового микроскопа МЕГЕОН 33102 (г)

Осуществлялось микрофотографирование 3D-изображения поверхности структуры для оценки шероховатости путем сканирующей электронной микроскопии (TESKAN MIRA 3) на экспериментальных образцах в разрезе, обработанных режущими, деформирующими и режуще-деформирующими метчиками (рисунок 3.4.7, *а*, *б*, *в*) в материалах АЛ 4, сталь 45 и нержавеющая сталь 34ХНЗМ (приложение В).

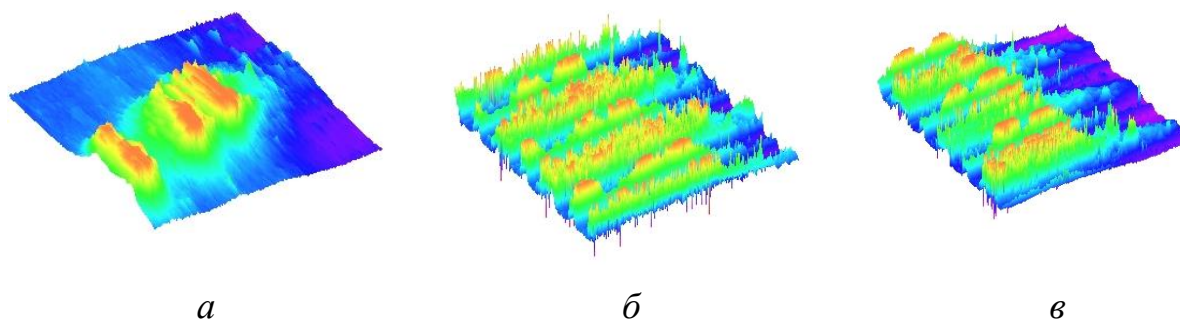


Рисунок 3.4.7 – Общий вид 3D-изображения поверхности структуры для оценки шероховатости на образцах, полученных режущим (*а*), деформирующим (*б*) и режуще-деформирующим (*в*) метчиками

Для количественной оценки точностных характеристик внутренних резьб, полученных различными способами, выполнены эксперименты и произведен анализ их результатов. Эксперимент был проведен путем обработки резьбы М5 на указанных ранее образцах. Отклонение профиля резьбы определяли последовательным измерением приведенного среднего диаметра D_2 набором калибр-пробок (Туламаш М 5.0х0.5 8g КИ, НЕ/ПР ТМ 94219), после чего производился расчет ширины впадины профиля по зависимости:

$$p = \frac{D_2}{1,732}.$$

Сравнение расчетных и экспериментальных данных показывает, что наибольшее отклонение экспериментальных значений погрешностей

приведенного среднего диаметра от требуемых составило 20 %.

На рис. 3.4.8 показано распределение отклонений фактических размеров среднего диаметра резьбовых отверстий, полученных режущими, деформирующими и деформирующе-режущими метчиками. Полученная характерная эмпирическая кривая распределения отклонений среднего диаметра D_2 подобна кривой нормального распределения. Из анализа кривой нормального распределения следует, что рассеяние отклонений диаметра ΔD_2 для режущего метчика составляет 150 % от поля допуска на резьбу М5 степени точности 4Н [25], степени точности 5Н - 140 % и степени точности 6Н – 115 %. Центр рассеяния смещен вправо относительно среднего диаметра метчика, что объясняется погрешностями технологической системы.

Измерения шага и половины угла профиля резьб, полученных деформирующими и режуще-деформирующими метчиками показали, что эти параметры полностью соответствуют требуемым и лежат в поле допуска.

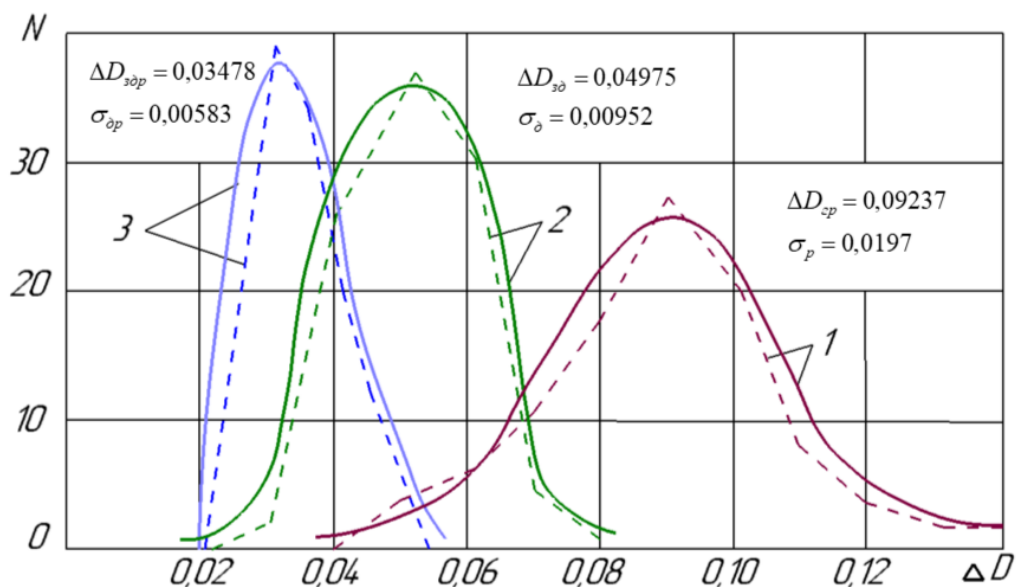


Рисунок 3.4.8 – Распределение отклонений среднего диаметра резьбы М5 в зависимости от варианта метчика: 1 – режущий, 2 – деформирующий, 3 – режуще-деформирующий

Точностные характеристики среднего диаметра резьбы для степеней точности 4Н, 5Н и 6Н лежат в поле допуска и максимальные значения в

процентном соотношении составляют: для деформирующих метчиков 75% от допуска на резьбу степени точности 4Н; для режуще-деформирующих метчиков – 45% от допуска на средний диаметр D_2 . Такое различие может быть объяснено разницей значений сил, действующих на зубья деформирующих и режуще-деформирующих метчиков, а соответственно, и различными значениями погрешностей, определяющих размах кривой закона распределения при этих способах формообразования резьбы. Кроме того, при получении резьб деформирующими метчиками, образующими резьбу по схеме с открытым профилем, имеют место дефекты в виде кратера 3 на вершине профиля резьбы (рисунок 3.4.6, б). Размер кратера соизмерим с полем допуска на внутренний диаметр резьбы D_1 , а в ряде случаев и превышает величину поля допуска.

Результаты статистического исследования трех вариантов метчиков на технологическую надежность представлены в таблице 3.4.9, где показаны математические ожидания $M[T''_{II}]$ дискретных случайных величин времени T''_{II} между двумя параметрическими отказами метчиков. Дисперсия $D[T''_{II}]$ при этом отличается от соответствующего математического ожидания на 56%, 24% и 23%, что с некоторым допущением может свидетельствовать о распределении случайной величины T''_{II} по закону Пуассона. Для статистического описания процесса возникновения параметрического отказа строили график относительных частот распределения $h[T''_{II}]$ для каждого варианта метчиков (рисунок 3.4.9).

Анализ графических зависимостей показал, что относительные частоты времени между параметрическими отказами для машинно-ручных метчиков (I_1), деформирующих (I_2) и режуще-деформирующих метчиков (I_3) подчиняются гамма-распределению, частным случаем которого является распределение Эрланга [51, 77, 79].

Таблица 3.4.9 – Экспериментальные значения времени между параметрическими отказами метчиков

№ п/п	Параметр	Вариант метчика		
		I_1	I_2	I_3
1.	Математическое ожидание $M[T_{II}^{//}], \text{мин}$	6,2	10,4	18,3
2.	Дисперсия $D[T_{II}^{//}]$	9,7	7,9	22,6

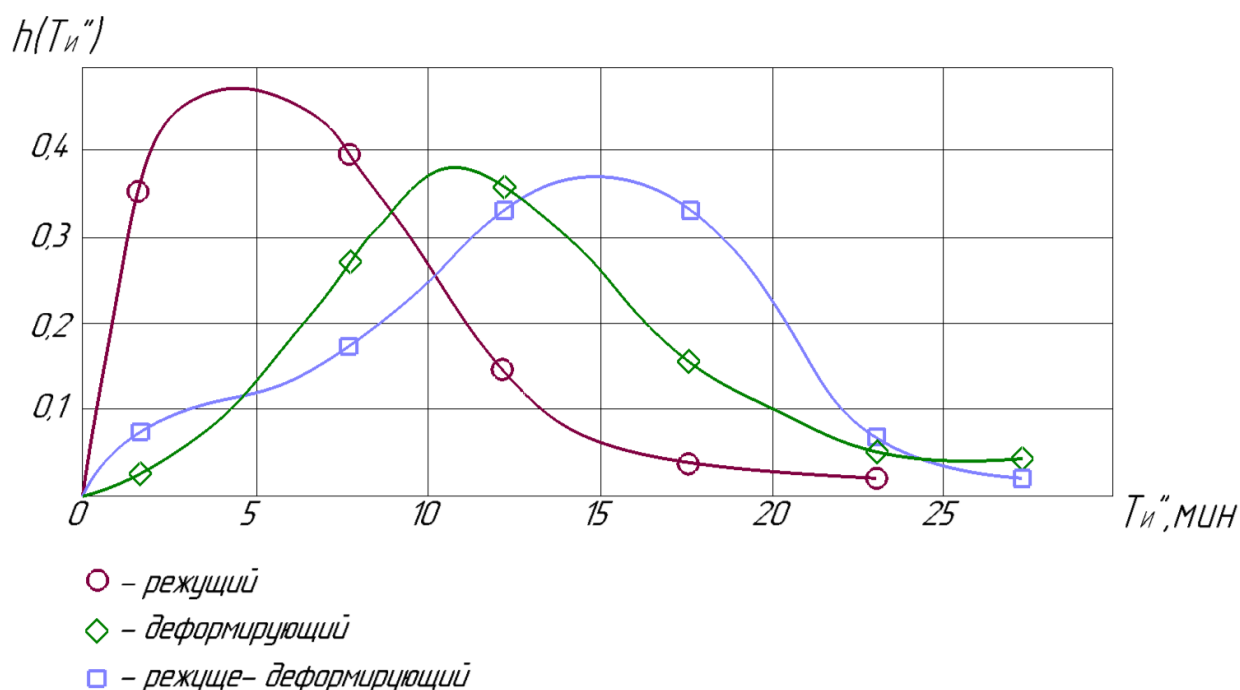


Рисунок 3.4.9 – Относительные частоты распределения времени между параметрическими отказами метчиков

При резбобработке изменение точности элементов технологической системы происходит из-за действия процессов, разделяемых по длительности на три основные группы: быстро протекающие, протекающие со средней скоростью, медленно протекающие [18]. Для метчиков наиболее характерными являются две первые группы. К быстро протекающим процессам относятся колебания суммарного крутящего момента на метчике, вибрации, изменения микротвердости по длине обработки. Процессы, протекающие со средней скоростью – это изменения температуры в зоне

обработки, износ зубьев. Для других технологических элементов характерно взаимодействие всех процессов, в том числе и медленно протекающих, которые действуют между периодическими осмотрами или ремонтами. Этот износ направляющих, ходовых пар, зубчатых передач, посадочных мест в шпинделе и резьбонарезных головках, коррозия деталей, старение электронных элементов. В связи с ограниченным временем испытаний учитывали процессы первых двух групп.

Время восстановления каждого технологического элемента после параметрического отказа, являющееся дискретной случайной величиной, исследовали в лабораторных условиях. Среднее время восстановления $T_{BI}^{//}$ инструмента после параметрического отказа – это время от момента предельного затупления старого метчика до начала работы нового, установленного на его место, включая время переточки либо удаления нароста, если они осуществлялись. Экспериментальные значения времени восстановления инструмента ($T_{BI}^{//}$) приведены в таблице 3.4.10. Восстановление элементов после параметрического отказа производили ручным способом. Данные об относительных частотах распределения времени восстановления $h(T_{BI}^{//})$ использовали для построения графиков $h(T_{BI}^{//}) = f(T_{BI}^{//})$ (рисунок 3.4.10). Анализ графических зависимостей, а также проверка по критерию Бартлетта подтвердили гипотезу об экспоненциальном распределении при описании потоков восстановления технологических элементов после параметрических отказов.

Таблица 3.4.10 – Экспериментальные значения времени восстановления метчиков после параметрических отказов

Параметр	Инструмент		
	I_1	I_2	I_3
Математическое ожидание $M[T_{BI}^{//}]$, мин	1,9	1,2	1,3

Проведенные исследования и результаты расчетов интенсивностей потоков отказов и восстановления (таблица 3.4.11) выявили наиболее слабые с точки зрения технологической надежности инструменты.

Таблица 3.4.11 – Значения интенсивностей потоков параметрических отказов и восстановления после этих отказов метчиков

№ п/п	Метчик		Интенсивность	
			отказов $\lambda, \text{мин}^{-1}$	восстановления $\mu, \text{мин}^{-1}$
1	Машинно-ручной	I_1	0,1612	0,5263
2	Деформирующий	I_2	0,0961	0,8333
3	Режуще-деформирующий	I_3	0,0546	0,7692

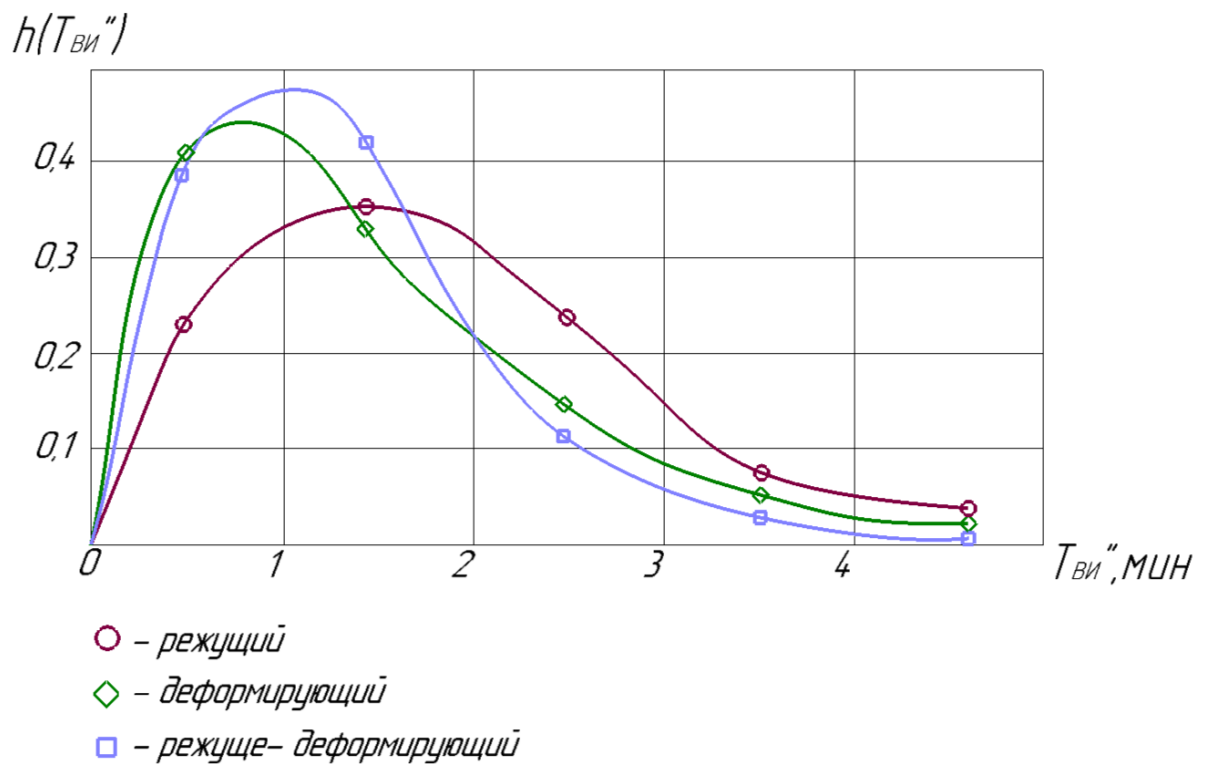


Рисунок 3.4.10 – Относительные частоты распределения времени восстановления после параметрических отказов

Так, самая высокая интенсивность отказов ($\lambda_1 = 0,1612 \text{ мин}^{-1}$) зафиксирована у машинно-ручных метчиков (I_1). При близкой по значениям

интенсивности восстановления μ_1 лучшие показатели по надежности ($\lambda_1 = 0,0546 \text{ мин}^{-1}$) имеют режущо-деформирующие метчики (I_3).

Таким образом, исследования параметрических отказов оборудования показали, что время между двумя отказами элементов распределено по обобщенному закону Эрланга, а время восстановления подчиняется экспоненциальному закону. При этом поток отказов – не пуассоновский, значит система не марковская, и найти вероятности состояний по методике, разработанной для марковских процессов с дискретными состояниями и непрерывным временем нельзя. Однако, процесс параметрических отказов, протекающий в системе, целесообразно в этом случае рассматривать на основе полумарковских процессов, применив для расчетов вероятностей состояний технологических элементов системы формообразования мелкогабаритных резьб в глухих глубоких отверстиях соответствующий математический аппарат теории массового обслуживания [118].

3.4.3 Исследование величин крутящих моментов при формообразовании МРвГГО

Для получения достоверных сведений о величинах крутящих моментов при формообразовании МРвГГО были проведены экспериментальные исследования по оценке величин крутящих моментов в процессе формообразования резьб в различных материалах метчиками трех структурных вариантов (I_1 , I_2 , I_3), выбранных в результате морфологического анализа во второй главе [4, 5, 119].

Анализ осциллограмм, характеризующих изменение крутящего момента в процессе образования резьбы в зависимости от метода, марки обрабатываемого материала и типа отверстия (сквозное или глухое), показывает следующее:

а) при обработке сквозных отверстий режущими метчиками имеет место резкое возрастание крутящего момента $M_{кр}$ при вхождении первых 3...4-х зубьев заборного участка в контакт с обрабатываемой поверхностью, постепенное возрастание $M_{кр}$ при контактировании всех зубьев заборного участка, более плавное увеличение $M_{кр}$ при последующем контакте зубьев калибрующего участка и после этого – резкое снижение $M_{кр}$ при выходе зубьев заборного участка из контакта с обрабатываемой поверхностью (рисунки 3.4.2, 3.4.3);

б) при нарезании резьб в глухих отверстиях наблюдается непрерывное увеличение $M_{кр}$ и в момент начала реверсирования метчика – резкий спад $M_{кр}$ и изменения его знака. Крутящий момент при вывинчивании $M_{кр.в}$ составляет 10...15 % по модулю от крутящего момента при нарезании резьбы $M_{кр}$;

в) при образовании сквозных отверстий деформирующими и режуще-деформирующими метчиками скачок крутящего момента возникает при вступлении в работу зубьев переходной зоны;

г) при нарезании резьб режущими метчиками имеют место более высокие амплитуды отклонений крутящих моментов при вхождении единичных зубьев в контакт с обрабатываемыми отверстиями, чем при резьбообработке деформирующими метчиками.

Крутящий момент при увеличении скорости до $V = 0,07$ м/с при нарезании резьб режущими метчиками (рисунок 3.4.11) уменьшается на 16 %, а затем – при дальнейшем ее повышении – практически не меняется.

Дисперсия крутящего момента увеличивается при увеличении скорости резьбонарезания, достигая максимума при $V = 0,16$ м/с. При формировании резьб деформирующими метчиками (рисунок 3.4.12) крутящий момент при

увеличении скорости до $V = 0,11 \text{ м/с}$ возрастает на 30 % и при дальнейшем повышении ее практически не меняется. Аналогичный характер изменения величин крутящих моментов $M_{кр}$ наблюдается при обработке резьб режущо-деформирующими метчиками (рисунок 3.4.13), однако приращение силовых характеристик составляет 10 %, что объясняется особенностью схемы обработки [17].

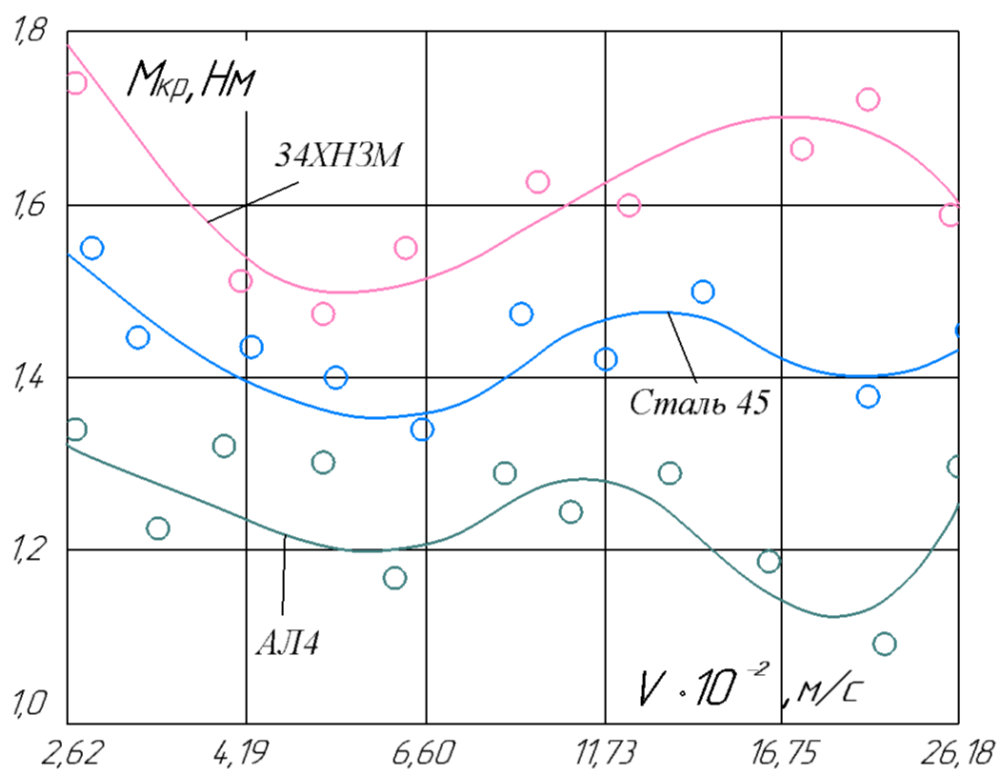


Рисунок 3.4.11 – Зависимость крутящего момента $M_{кр}$ от скорости резбонарезания режущим метчиком М5 (материал – сталь 45, 34ХНЗМ, АЛ4)

Влияние диаметра исходного отверстия $D_{отв}$ под образование резьбы деформирующими метчиками на величину крутящего момента $M_{кр}$ при резбоформировании (рисунок 3.4.14) имеет вид экспоненциальной зависимости, резко возрастающей при уменьшении $D_{отв}$.

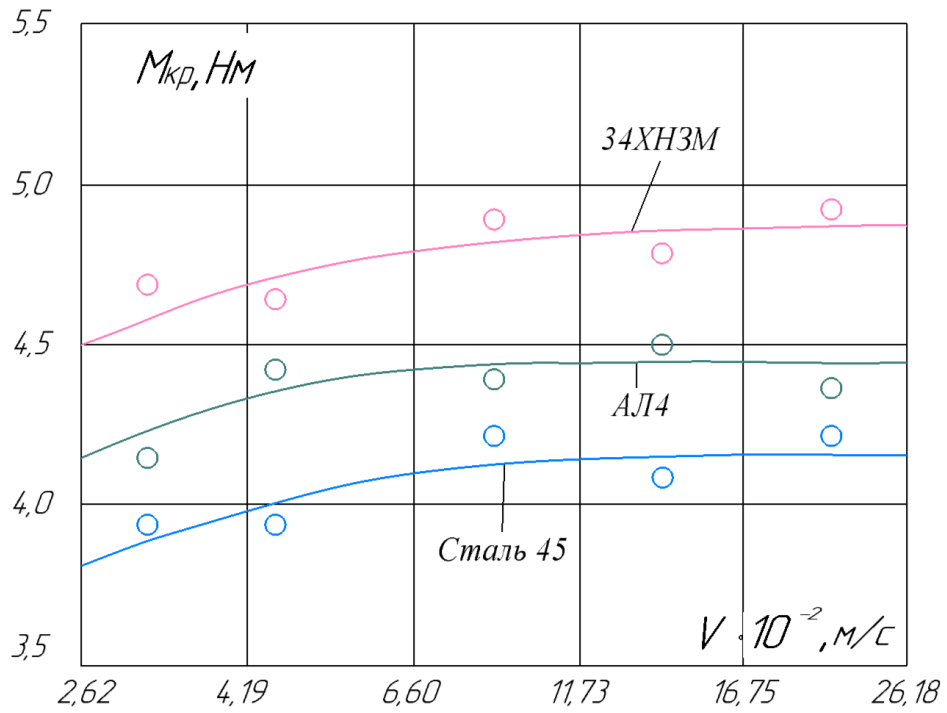


Рисунок 3.4.12 – Влияние скорости резбообразования на крутящий момент $M_{кр}$ при работе деформирующего метчика (М5, материал – сталь 45, 34ХНЗМ, АЛ4)

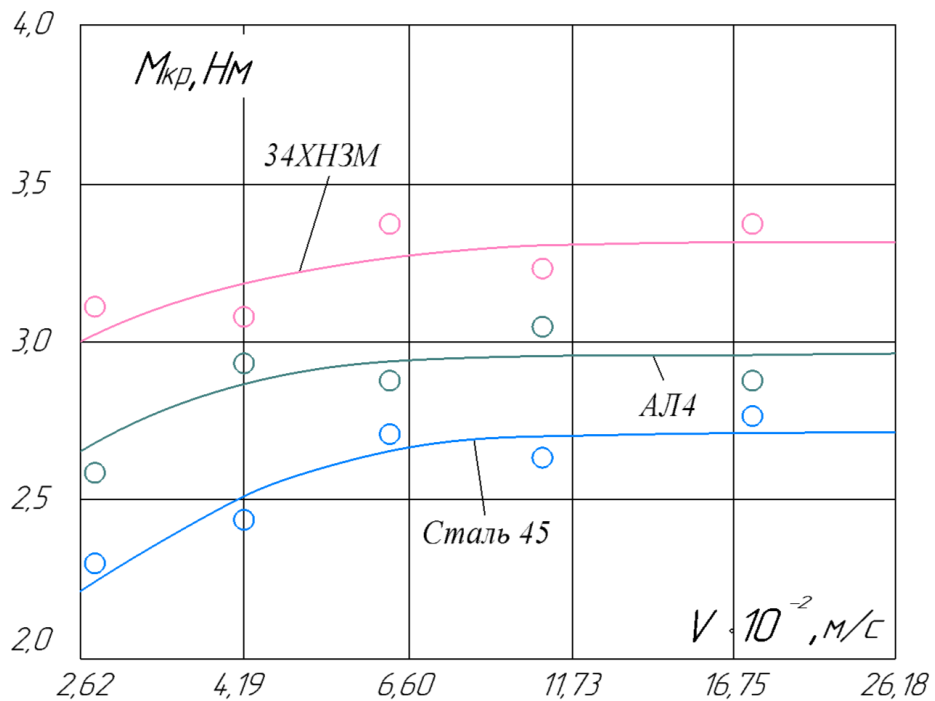


Рисунок 3.4.13 – Влияние скорости резбообразования на крутящий момент при работе режуще-деформирующими метчиками (М5, материал – сталь 45, 34ХНЗМ, АЛ4)

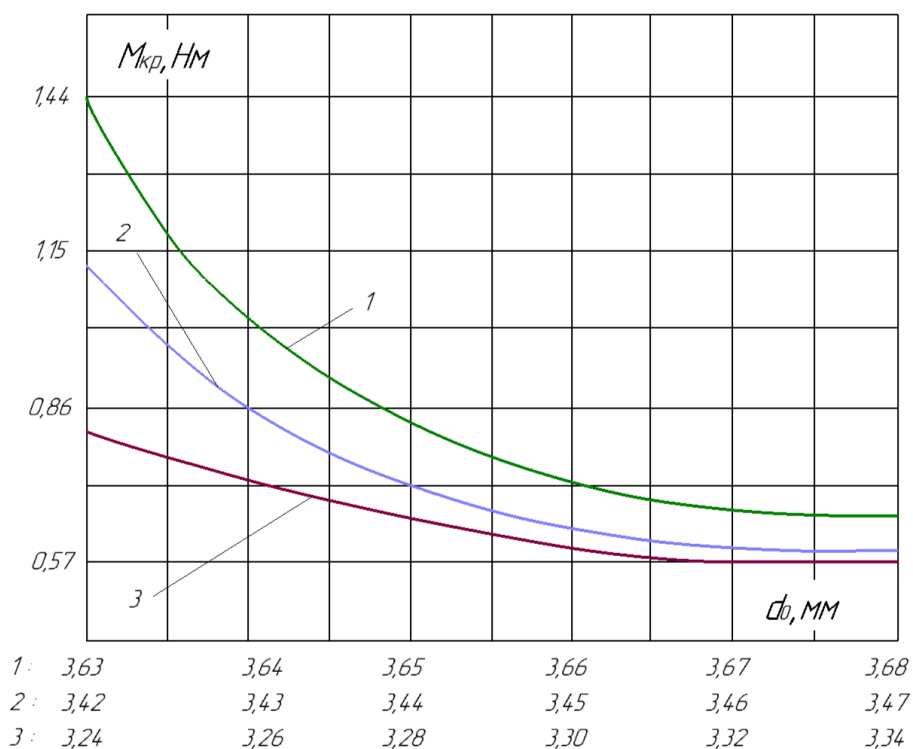


Рисунок 3.4.14 – Влияние диаметра исходного цилиндрического отверстия на крутящий момент при резбообразовании: 1 – деформирующий метчик; 2 – режуще-деформирующий метчик; 3 – режущий метчик

Динамику процесса МРВГТО различными способами наглядно иллюстрируют циклограммы. Анализ циклограмм (рисунок 3.4.15) и осциллограмм (рисунок 3.4.16), характеризующих изменение крутящего момента $M_{кр}$ от времени T в процессе образования резьбы в зависимости от способа изготовления мелкоразмерных резьб в глухих глубоких отверстиях режуще-деформирующими метчиками показал следующее:

а) на циклограмме (рисунок 3.4.15, а) при самом распространенном способе нарезании резьбы с равномерной подачей наблюдается несколько четко разделенных зон: ab – врезание заборного конуса; bc – вступление в работу калибрующей части; cd – завершение прямого хода при замедлении частоты вращения до 0; de – начало реверса до момента вывинчивания первых калибрующих витков; ef – завершение реверса метчика; fg – отвод метчика на величину врезания;

б) на циклограмме (рисунок 3.4.15, б) с прерывистой подачей при нарезании резьбы [1] наблюдается несколько характерных зон: ab – врезание заборного конуса ввинчиванием метчика на 1...2 оборота; bcd – реверсирование с вывинчиванием на 0,5 оборота; $a'k'b'$ – врезание заборного конуса метчика и вступление в работу калибрующей части с ввинчиванием на следующие 1...2 оборота; $b'c'd'$ – реверсирование с вывинчиванием на 0,5 оборота; $a^N k^N b^N$ – врезание метчика с ввинчиванием на следующие 1...2 оборота до достижения заданной длины обрабатываемой резьбы глухого глубокого отверстия; $b^N c^N d^N a^0$ – реверсирование с вывинчиванием на 0,5 оборота и отвод метчика на величину врезания;

в) на циклограмме (рисунок 3.4.15, в) с циклической подачей и удалением стружки на каждом цикле при нарезании резьбы наблюдаются характерные зоны: ab – врезание заборного конуса ввинчиванием метчика на 2...3 шага резьбы; $bcdefa'$ – реверсирование с вывинчиванием метчика из отверстия с отводом на величину врезания; $a'k'b'$ – ввинчивание метчика на длину предыдущего рабочего хода и следующее врезание метчика на 2...3 шага резьбы; $a''k''b''$ – ввинчивание метчика на длину предыдущего рабочего хода и следующее врезание метчика на 2...3 шага резьбы до достижения заданной длины обрабатываемой резьбы глухого глубокого отверстия; $b''c''d''e''f''a^0$ – реверсирование с вывинчиванием метчика из обработанного отверстия с отводом на величину врезания.

При анализе полученных осциллограмм (рисунок 3.4.16), характеризующих изменение крутящего момента $M_{кр}$ от времени T необходимо учесть тот факт, что:

$$M_{кр} = M_{p.d} + M_{m.e} + M_{m.c}$$

где $M_{p.d}$ – момент сопротивления резанию и пластическому деформированию; $M_{m.e}$ – момент трения зубьев о витки резьбы; $M_{m.c}$ – момент трения стружки о витки резьбы.

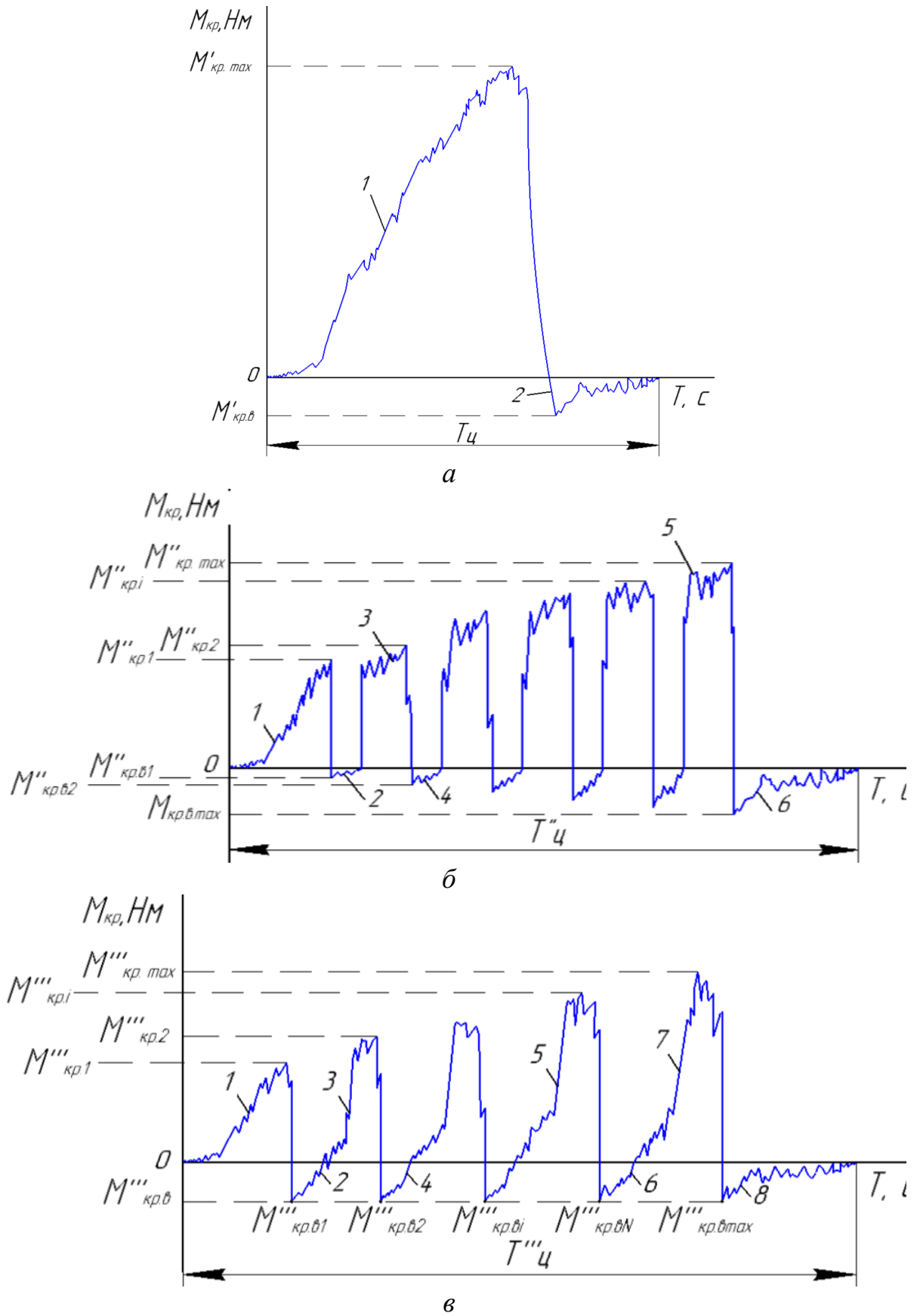


Рисунок 3.4.16 – Осциллограммы крутящих моментов $M_{кр}$ при МРВГТО разными способами: *a* – с равномерной подачей; *б* – с прерывистой подачей; *в* – с циклической подачей и удалением стружки на каждом цикле

При этом в процессе образования резьбы в зависимости от способа изготовления мелкогабаритных резьб в глухих глубоких отверстиях режущими деформирующими метчиками необходимо также отметить следующие особенности:

а) на осциллограмме (рисунок 3.4.16, а) при самом распространенном способе нарезания резьбы с равномерной подачей наблюдаются характерные участки: 1 – возрастание от 0 до $M'_{кр.мах}$ от момента врезания заборного конуса и последующего вступления в работу калибрующей части до завершения прямого хода при замедлении частоты вращения до 0; 2 – начало реверса с изменением от 0 до отрицательного момента вывинчивания $M'_{кр.в}$ от первых калибрующих витков до завершения реверса метчика с отводом на величину врезания; время цикла $T_{ц}$ при этом будет состоять из основного t_0 и вспомогательного времени t_g на подвод и отвод метчика, основное время при этом способе определяется по формуле:

$$t_0 = 2L_{р.х} / P \cdot n, \quad (3.1)$$

где $L_{р.х}$ – длина рабочего хода, мм (равна заданной длине обрабатываемой резьбы L глухого глубокого отверстия); P – подача метчика, численно равная шагу его резьбы, мм/об, n – частота вращения метчика, мин⁻¹,

б) на осциллограмме (рисунок 3.4.16, б) с прерывистой подачей при нарезании резьбы наблюдаются следующие характерные участки: 1 – возрастание $M_{кр}$ от 0 до $M''_{кр.1}$ при врезании заборного конуса ввинчиванием метчика на 1...2 оборота; 2 – реверсирование с изменением $M''_{кр.в}$ от 0 до отрицательного момента вывинчивания $M''_{кр.в1}$ с вывинчиванием на 0,5 оборота; 3 – возрастание $M_{кр}$ от $M''_{кр.1}$ до $M''_{кр.2}$ при продолжении врезания

заборного конуса метчика и вступлении в работу калибрующей части с ввинчиванием на следующие 1...2 оборота; 4 – реверсирование с изменением $M''_{кр.в}$ от 0 до отрицательного момента вывинчивания $M''_{кр.в2}$ с вывинчиванием на 0,5 оборота; 5 – возрастание $M_{кр}$ от $M''_{кр.i}$ до $M''_{кр.мах}$ при продолжении врезания заборного конуса метчика и работе калибрующей части с ввинчиванием на следующие 1...2 оборота до достижения заданной длины обрабатываемой резьбы глухого глубокого отверстия; 6 – реверсирование с изменением $M''_{кр.в}$ от 0 до отрицательного момента вывинчивания $M''_{кр.в\max}$ с вывинчиванием на 0,5 оборота и отвод метчика на величину врезания; время цикла $T_{ц}$ при этом также будет состоять из основного t_0 и вспомогательного времени t_{ϵ} на подвод и отвод метчика, причем, основное время при этом способе определяется по формуле:

$$t_0 = [i \cdot (L''_{р.х1} + \Delta) + L_{р.х}] / P \cdot n, \quad (3.2)$$

где $L_{р.х}$ – длина рабочего хода, мм (равна заданной длине обрабатываемой резьбы L глухого глубокого отверстия); $L''_{р.х1}$ – длина рабочего хода на первом участке врезания ($L''_{р.х1} = 1...2P$), мм; Δ – величина вывинчивания на каждом участке после врезания ($\Delta = 0,5P$), мм; i – число вывинчиваний на величину Δ после врезания до достижения заданной длины обрабатываемой резьбы; P – подача метчика, численно равная шагу его резьбы, мм/об, n – частота вращения метчика, мин⁻¹;

в) на осциллограмме (рисунок 3.4.16, в) с циклической подачей и удалением стружки на каждом цикле при нарезании резьбы наблюдаются следующие характерные участки: 1 – возрастание $M_{кр}$ от 0 до $M'''_{кр.1}$ при врезании заборного конуса ввинчиванием метчика на 2...3 шага резьбы; 2 – реверсирование с изменением $M'''_{кр.в}$ от 0 до отрицательного момента

вывинчивания $M_{кр.в1}^{///}$ с вывинчиванием метчика из отверстия с отводом на величину врезания и очисткой от стружки; 3 – возрастание $M_{кр}$ от 0 до $M_{кр.в2}^{///}$ при ввинчивании метчика на длину предыдущего рабочего хода и следующем его врезании на 2...3 шага резьбы; 4 – реверсирование с изменением $M_{кр.в}^{///}$ от 0 до отрицательного момента вывинчивания $M_{кр.в2}^{///}$ с вывинчиванием метчика из отверстия с отводом на величину врезания и очисткой от стружки; 5 – возрастание $M_{кр}$ от 0 до $M_{кр.i}^{///}$ при ввинчивании метчика на длину предыдущего рабочего хода и следующем врезании на 2...3 шага резьбы; 6 – реверсирование с изменением $M_{кр.в}^{///}$ от 0 до отрицательного момента вывинчивания $M_{кр.вN}^{///}$ с вывинчиванием метчика из отверстия с отводом на величину врезания и очисткой от стружки; 7 – возрастание $M_{кр}$ от 0 до $M_{кр.мах}^{///}$ до достижения заданной длины обрабатываемой резьбы глухого глубокого отверстия; 8 – реверсирование с изменением $M_{кр.в}^{///}$ от 0 до отрицательного момента вывинчивания $M_{кр.в\max}^{///}$ с вывинчиванием метчика из обработанного отверстия с отводом на величину врезания и очисткой от стружки;

– время цикла $T_{ц}$ при этом также будет состоять из основного t_0 и вспомогательного времени $t_{в}$ на подвод и отвод метчика, причем, основное время при этом способе определяется по формуле:

$$t_0 = [2(L_{р.х1}^{///} + (N-1) \cdot \Delta) + L_{р.х}] / P \cdot n, \quad (3.3)$$

где $L_{р.х1}^{///}$ – длина рабочего хода на первом цикле нарезания резьбы (с величиной врезания – L_0) $L_{р.х1}^{///} = L_0 + (2...3P)$, мм; Δ – величина дополнительного врезания на каждом цикле ($\Delta = 2...3P$), мм; N – число циклов до достижения заданной длины обрабатываемой резьбы глухого глубокого

отверстия; P – подача метчика, численно равная шагу его резьбы, мм/об, n – частота вращения метчика, мин⁻¹.

3.5 Основные результаты экспериментальных исследований по динамике изменения крутящих моментов и проверке адекватности теоретической модели нового способа МРвГГО как составляющей технологической системы

Анализ полученных экспериментальных данных и построенные на их основе графические зависимости (рисунки 3.4.1, 3.4.7...3.4.15) позволяют оценить предварительные результаты исследований по динамике изменения крутящих моментов при использовании признанных ранее в результате морфологического анализа наиболее рациональными вариантами структур метчиков I_1 , I_2 , I_3 [18], и проверке адекватности теоретической модели нового способа резбообразования на основе программного управления X_{27} с циклической подачей и удалением стружки на каждом цикле в сравнении с ранее известными – резбообразованием X_{21} с равномерной подачей и резбообразованием с прерывистой X_{22} подачей (таблица 2.3.1).

В Приложении Б представлены экспериментально полученные значения по суммарным крутящим моментам $M_{кр}$ в процессе мелкоразмерной резбообработки в глухих глубоких отверстиях для трех разных способов обработки в трех различных материалах (таблицы Б.1...Б.9).

Средние значения по основным динамическим показателям $M_{кр.мах}$ и времени цикла $T_{ц}$ для каждого варианта инструмента и обрабатываемых материалов при трех разных способах обработки в глухих глубоких отверстиях представлены в таблице 3.5.1. Математические ожидания наработки на отказ функционирования $M[T_{н}']$ и параметрический отказ $M[T_{н}^{//}]$, а также соответствующие значения математического ожидания

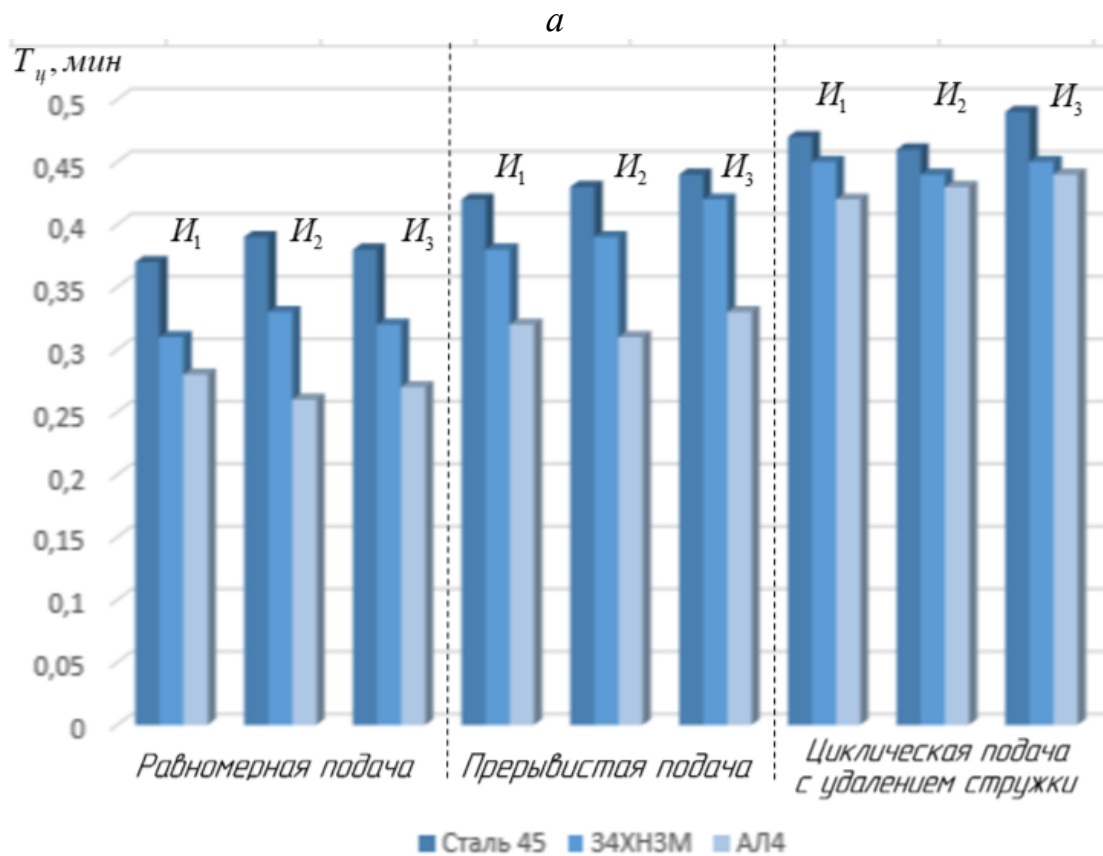
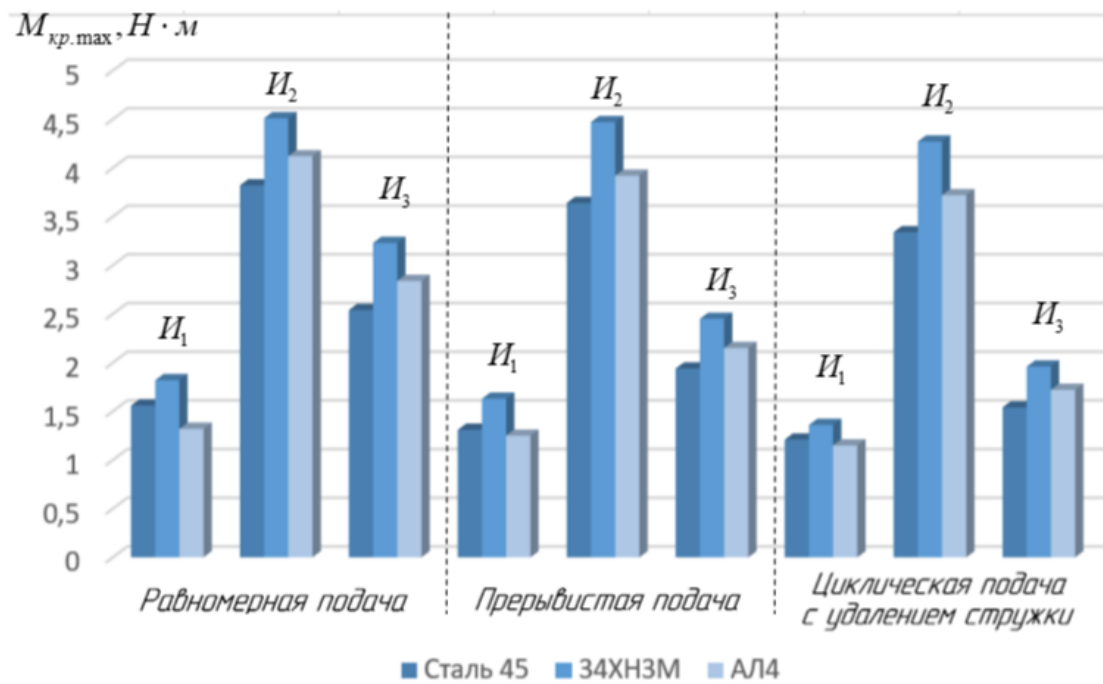
времени восстановления метчиков после отказа функционирования $M[T_{\text{ВН}}']$ и после параметрического отказа $M[T_{\text{ВН}}'']$ сведены в таблицу 3.5.2.

Таблица 3.5.1 – Результаты экспериментальных исследований метчиков по динамике изменения крутящих моментов $M_{\text{кр.мах}}$ и времени цикла $T_{\text{ц}}$

№ п/п	Способ подачи	Материал	$M_{\text{кр.мах}}, \text{Нм}$			$T_{\text{ц}}, \text{мин}$		
			I_1	I_2	I_3	I_1	I_2	I_3
1.	Равномерная	Сталь 45	1,56	3,82	2,54	0,37	0,39	0,38
		34ХНЗМ	1,82	4,51	3,23	0,31	0,33	0,32
		АЛ4	1,32	4,12	2,84	0,28	0,26	0,27
2.	Прерывистая	Сталь 45	1,31	3,94	2,14	0,42	0,43	0,44
		34ХНЗМ	1,63	4,47	2,45	0,38	0,39	0,42
		АЛ4	1,25	3,92	2,15	0,32	0,31	0,33
3.	Циклическая с удалением стружки на каждом цикле	Сталь 45	1,21	3,34	1,65	0,47	0,46	0,49
		34ХНЗМ	1,36	4,27	2,06	0,45	0,44	0,45
		АЛ4	1,15	3,72	1,72	0,42	0,43	0,44

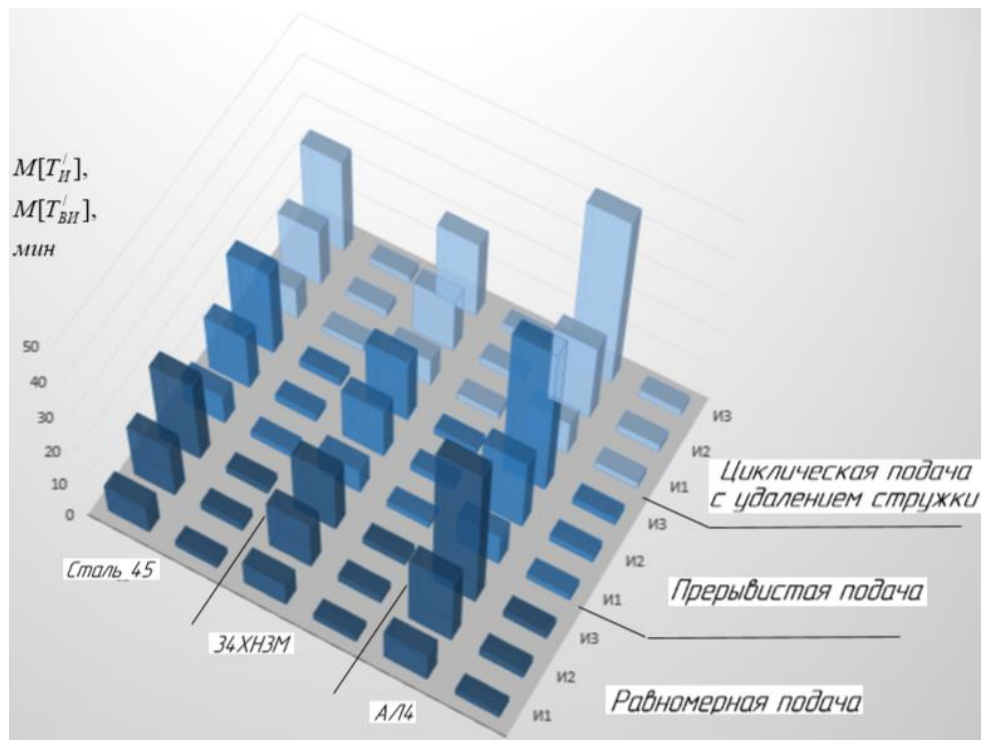
Таблица 3.5.2 – Результаты экспериментальных исследований метчиков по параметрам потоков отказов и восстановлений

№ п/п	Способ подачи	Материал	$M[T_{\text{И}}']/M[T_{\text{ВН}}']$			$M[T_{\text{И}}'']/M[T_{\text{ВН}}'']$		
			I_1	I_2	I_3	I_1	I_2	I_3
1.	Равномерная	Сталь 45	7,9/1,8	14,6/2,1	21,9/1,9	6,2/1,9	10,4/1,2	18,3/1,3
		34ХНЗМ	6,6/1,8	13,3/2,1	16,8/1,9	5,2/1,9	9,5/1,2	14,1/1,3
		АЛ4	8,2/1,8	18,9/2,1	39,2/1,9	6,4/1,9	11,5/1,2	20,4/1,3
2.	Прерывистая	Сталь 45	8,1/1,8	14,9/2,1	22,9/1,9	6,7/1,9	10,9/1,2	18,9/1,3
		34ХНЗМ	6,9/1,8	13,7/2,1	17,3/1,9	5,6/1,9	9,8/1,2	14,8/1,3
		АЛ4	8,7/1,8	19,5/2,1	39,9/1,9	6,8/1,9	11,9/1,2	20,7/1,3
3.	Циклическая с удалением стружки на каждом цикле	Сталь 45	8,5/1,8	15,2/2,1	24,9/1,9	7,7/1,9	12,9/1,2	22,9/1,3
		34ХНЗМ	7,3/1,8	14,1/2,1	20,5/1,9	6,6/1,9	10,8/1,2	18,8/1,3
		АЛ4	9,1/1,8	20,5/2,1	44,9/1,9	7,8/1,9	15,9/1,2	38,7/1,3

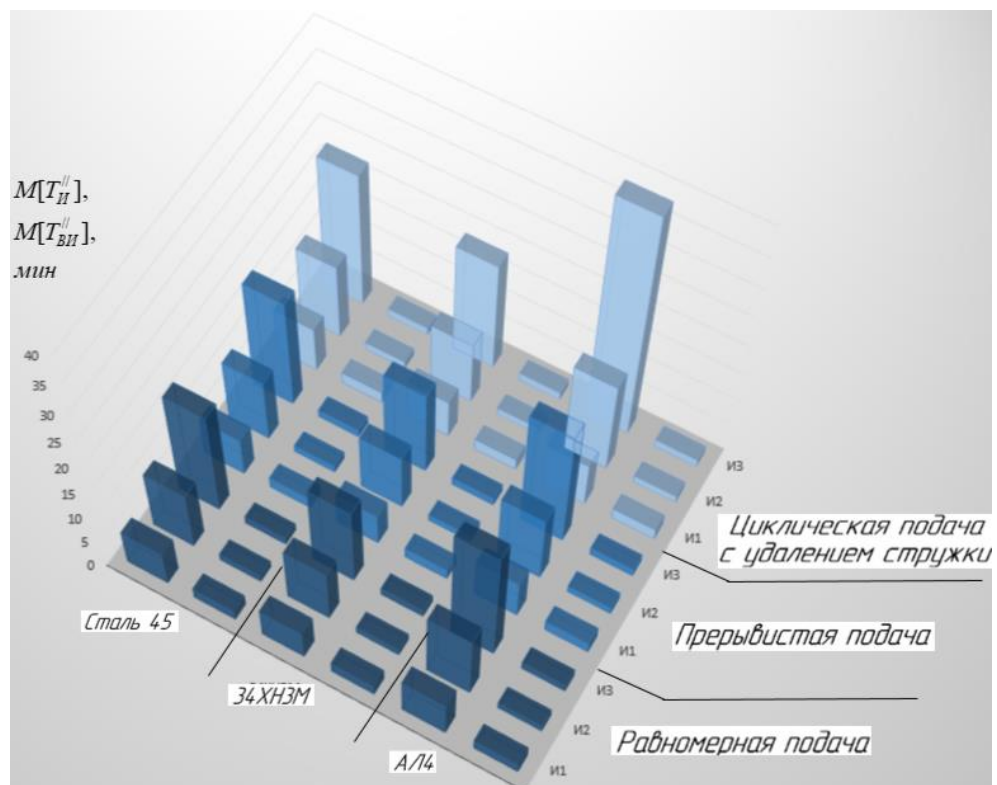


б

Рисунок 3.5.1 – Графики зависимостей изменения при МРвГГО крутящих моментов $M_{кр.мах}$ (а) и времени цикла $T_{ц}$ (б) для разных способов подачи, материалов и видов инструмента



а



б

Рисунок 3.5.2 – Графики зависимостей изменения при МРвГГО параметров потоков отказов функционирования и восстановлений (а), а также параметрических отказов и восстановлений (б) от марки обрабатываемого материала и способов подачи метчиков I_1, I_2, I_3

Анализ полученных экспериментальных данных (таблицы 3.5.1 и 3.5.2) и построенные на их основе графические зависимости (рисунки 3.5.1, 3.5.2) позволяют оценить предварительные результаты исследований по динамике изменения крутящих моментов при использовании признанных ранее в результате морфологического анализа наиболее рациональными вариантов структур метчиков и проверке способов резбообразования с равномерной подачей, с прерывистой подачей и с циклической подачей и удалением стружки на каждом цикле.

1. Наибольшие значения $M_{кр.мах}$ показали деформирующие метчики I_2 , меньшие показатели – у режущих метчиков I_1 , в промежутке между ними – режуще-деформирующие I_3 . Причем такая особенность наблюдается для всех исследованных обрабатываемых материалов деформирующими метчиками I_2 при небольшом снижении $M_{кр.мах}$ при переходе от способа резбообразования с равномерной подачей к способу с прерывистой подачей (в 1,05...1,14 раза) и с циклической подачей и удалением стружки на каждом цикле (в 1,06...1,15 раза).

Для всех исследованных обрабатываемых материалов режущими метчиками I_1 наблюдается некоторое снижение $M_{кр.мах}$ при переходе от способа резбообразования с равномерной подачей к способу с прерывистой подачей (в 1,06...1,22 раза) и с циклической подачей и удалением стружки на каждом цикле (в 1,15...1,34 раза). Для всех обрабатываемых материалов режуще-деформирующими метчиками I_3 наблюдается значительное снижение $M_{кр.мах}$ при переходе от способа резбообразования с равномерной подачей к способу с прерывистой подачей (в 1,19...1,32 раза) и с циклической подачей и удалением стружки на каждом цикле (в 1,53...1,64 раза).

2. Результаты экспериментальных исследований метчиков по времени цикла T_u обработки при МРвГГО показывают, что время цикла для режущего

метчика I_1 для всех обрабатываемых материалов несколько возрастает при переходе от способа резбообразования с равномерной подачей к способу с прерывистой подачей (в 1,13...1,23 раза) и с циклической подачей и удалением стружки на каждом цикле (в 1,27...1,50 раза).

Для всех исследованных обрабатываемых материалов деформирующими метчиками I_2 наблюдается увеличение T_u при переходе от способа резбообразования с равномерной подачей к способу с прерывистой подачей (в 1,10...1,19 раза) и с циклической подачей и удалением стружки на каждом цикле (в 1,18...1,65 раза).

Для всех исследованных обрабатываемых материалов режуще-деформирующими метчиками I_3 также наблюдается увеличение T_u при переходе от способа резбообразования с равномерной подачей к способу с прерывистой подачей (в 1,16...1,31 раза) и с циклической подачей и удалением стружки на каждом цикле (в 1,29...1,63 раза).

3. Результаты экспериментальных исследований метчиков по параметрам потоков отказов и восстановлений (математические ожидания наработки на отказ функционирования $M[T'_H]$ и времени восстановления метчиков после отказа функционирования $M[T'_{BH}]$) для режущего метчика I_1 для всех обрабатываемых материалов показывает некоторое возрастание величины наработки на отказ $M[T'_H]$ при переходе от способа резбообразования с равномерной подачей к способу с прерывистой подачей (в 1,03...1,06 раза) и с циклической подачей и удалением стружки на каждом цикле (в 1,08...1,11 раза) при практически неизменяющемся времени восстановления ($M[T'_{BH}] = 1,8$ мин).

Для всех исследованных обрабатываемых материалов деформирующими метчиками I_2 режуще-деформирующими метчиками I_3 наблюдается возрастание величины наработки на отказ $M[T'_H]$ при переходе

от способа резбообразования с равномерной подачей к способу с прерывистой подачей (в 1,02...1,03 раза) и с циклической подачей и удалением стружки на каждом цикле (в 1,04...1,08 раза) при практически неизменяющемся времени восстановления ($M[T'_{BH}] = 2,1 \text{ мин}$).

Для всех исследованных обрабатываемых материалов режуще-деформирующими метчиками I_3 также наблюдается возрастание величины наработки на отказ функционирования $M[T'_H]$ при переходе от способа резбообразования с равномерной подачей к способу с прерывистой подачей (в 1,02...1,05 раза) и с циклической подачей и удалением стружки на каждом цикле более существенное возрастание (в 1,14...1,22 раза) при практически неизменяющемся времени восстановления ($M[T'_{BH}] = 1,9 \text{ мин}$).

Примеры полученных в трех обрабатываемых материалах экспериментальных образцов (в разрезе) после резбообразования резьбы $M5$ в глухих глубоких отверстиях режуще-деформирующим метчиком I_3 с циклической подачей и удалением стружки на каждом цикле представлены на рисунке 3.5.3.

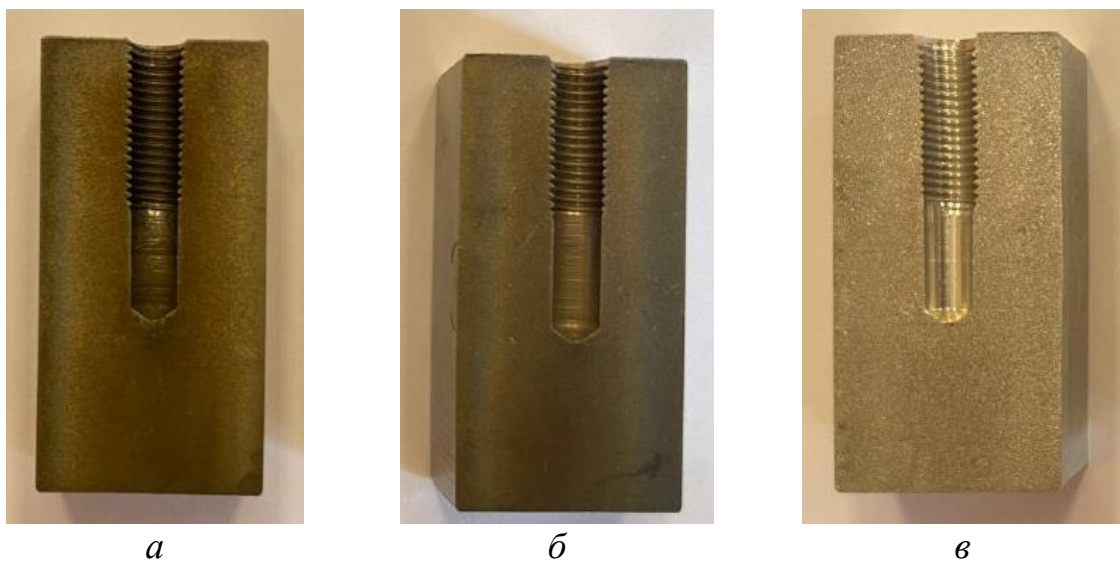


Рисунок 3.5.3 – Экспериментальные образцы после резбообразования в обрабатываемых материалах новым способом с циклической подачей и удалением стружки на каждом цикле: *а* – сталь 45; *б* – 34ХНЗМ; *в* – АЛ4

4. Результаты экспериментальных исследований метчиков по параметрам потоков отказов и восстановлений (математические ожидания наработки на параметрический отказ $M[T_{II}^{//}]$ и времени восстановления метчиков после параметрического отказа $M[T_{БИ}^{//}]$) для режущего метчика $И_1$ для всех обрабатываемых материалов показывают некоторое возрастание величины наработки на отказ $M[T_{II}^{//}]$ при переходе от способа резбообразования с равномерной подачей к способу с прерывистой подачей (в 1,06...1,08 раза) и с циклической подачей и удалением стружки на каждом цикле (в 1,22...1,27 раза) при практически неизменяющемся времени восстановления ($M[T_{БИ}^{//}] = 1,9$ мин).

Для всех исследованных обрабатываемых материалов деформирующими метчиками $И_2$ наблюдается возрастание величины наработки на отказ $M[T_{II}^{//}]$ при переходе от способа резбообразования с равномерной подачей к способу с прерывистой подачей (в 1,03...1,05 раза) и с циклической подачей и удалением стружки на каждом цикле (в 1,10...1,38 раза) при практически неизменяющемся времени восстановления ($M[T_{БИ}^{//}] = 1,2$ мин).

Для всех исследованных обрабатываемых материалов режуще-деформирующими метчиками $И_3$ также наблюдается возрастание величины наработки на параметрический отказ $M[T_{II}^{//}]$ при переходе от способа резбообразования с равномерной подачей к способу с прерывистой подачей (в 1,01...1,05 раза) и с циклической подачей и удалением стружки на каждом цикле более существенное возрастание (в 1,25...1,89 раза) при практически неизменяющемся времени восстановления ($M[T_{БИ}^{//}] = 1,3$ мин).

3.6 Выводы по разделу

Таким образом, в результате проведенных экспериментальных

исследований получены данные о динамике изменения крутящих моментов в процессе обработки МРвГГО, проверена адекватность теоретической модели нового способа МРвГГО как составляющей технологической системы, предложенной во второй главе диссертации, предусматривающей выбор технологических элементов для МРвГГО, соответствующих по структуре и параметрам рациональным вариантам, выявленным в процессе морфологического анализа.

1. Разработанные методики и конструкция экспериментальной установки на станке мод. MAXXmill 630 с использованием установленной на рабочей поверхности стола специально разработанной конструкции динамометра с поворотной платформой и тензодатчиком позволяют изучать параметры потоков отказов функционирования и параметрических отказов, а также параметров потоков восстановления после соответствующих отказов при МРвГГО.

2. Выполненные эксперименты позволили выявить наиболее частые причины отказов функционирования метчиков режущих (I_1) – поломки рабочей части, деформирующих (I_2) – выкрашивание зубьев заборного участка и переходных зубьев между заборным и калибрующим участками, режуще-деформирующих метчиков (I_3) – выход из строя как по первой, так и по второй причинам примерно в равных соотношениях. Самая высокая интенсивность отказов ($\lambda_1 = 0,1265 \text{ мин}^{-1}$) зафиксирована у машинно-ручных метчиков (I_1). При практически одинаковой интенсивности восстановления μ_1 лучшие показатели по надежности ($\lambda_1 = 0,0456 \text{ мин}^{-1}$) имеют режуще-деформирующие метчики (I_3).

3. В результате проведенных исследований в лабораторных условиях на экспериментальной установке выявлена общая закономерность увеличения суммарного крутящего момента $M_{кр}$ относительно величины его математического ожидания для каждого из вариантов метчиков, полученные осциллограммы крутящего момента поясняют изменение его величины во

время обработки и в период наступления параметрического отказа. Наиболее характерными видами параметрических отказов режущих метчиков I_1 были: наростообразование обрабатываемого материала на передних и боковых поверхностях зубьев; скалывание вершин зубьев; притупление кромок; оплавление кромок зубьев рабочей части. Наиболее характерным для деформирующих метчиков (I_2) было явление наростообразования на заборном и калибрующем участках, причем, величина и форма налипания меняется на одном и том же витке после каждого обработанного отверстия и не является подобием предыдущей. Для режуще-деформирующих метчиков (I_3) на режущих участках наблюдались скалывание вершин и притупление кромок, а на деформирующих участках – наростообразование и скругление вершин зубьев. При получении резьб, в особенности, в алюминиевых сплавах, имеет место наростообразование обрабатываемого материала на зубьях заборного и переходного участков, что объясняется высокими контактными напряжениями. Так, самая высокая интенсивность параметрических отказов ($\lambda_1 = 0,1612 \text{ мин}^{-1}$) зафиксирована у машинно-ручных метчиков (I_1). При близкой по значениям интенсивности восстановления μ_1 лучшие показатели по технологической надежности ($\lambda_1 = 0,0546 \text{ мин}^{-1}$) имеют режуще-деформирующие метчики (I_3).

4. Анализ полученных экспериментальных данных и построенные на их основе графические зависимости позволяют оценить предварительные результаты исследований по динамике изменения крутящих моментов при использовании признанных ранее в результате морфологического анализа наиболее рациональными вариантов структур метчиков и проверке способов резьбообразования. Для всех обрабатываемых материалов режуще-деформирующими метчиками I_3 наблюдается значительное снижение $M_{кр. max}$ при переходе от способа резьбообразования с равномерной подачей к

способу с прерывистой подачей (в 1,19...1,32 раза) и с циклической подачей и удалением стружки на каждом цикле (в 1,53...1,64 раза).

При этом для обрабатываемых материалов режуще-деформирующими метчиками I_3 наблюдается увеличение T_u при переходе от способа резбообразования с равномерной подачей к способу с прерывистой подачей (в 1,16...1,31 раза) и с циклической подачей и удалением стружки на каждом цикле (в 1,29...1,63 раза).

Для всех обрабатываемых материалов режуще-деформирующими метчиками I_3 наблюдается возрастание величины наработки на отказ функционирования $M[T'_H]$ при переходе от способа резбообразования с равномерной подачей к способу с прерывистой подачей (в 1,02...1,05 раза) и с циклической подачей и удалением стружки на каждом цикле более существенное возрастание (в 1,14...1,22 раза) при практически неизменяющемся времени восстановления ($M[T'_{BH}] = 1,9$ мин).

Для всех обрабатываемых материалов режуще-деформирующими метчиками I_3 также наблюдается возрастание величины наработки на параметрический отказ $M[T'_H]$ при переходе от способа резбообразования с равномерной подачей к способу с прерывистой подачей (в 1,01...1,05 раза) и с циклической подачей и удалением стружки на каждом цикле более существенное возрастание (в 1,25...1,89 раза) при практически неизменяющемся времени восстановления ($M[T'_{BH}] = 1,3$ мин).

5. Проведенные качественная и количественная оценки свидетельствуют об адекватности теоретической модели нового способа МРВГГО как перспективной составляющей технологической системы, позволяющей повысить эффективность процесса путем повышения качества обработки, а также эксплуатационной и технологической надежности рациональных вариантов метчиков, выявленных в процессе морфологического анализа. При этом для окончательного решения по

предлагаемой методике целесообразно проведение с использованием полученных экспериментальных данных машинного эксперимента на основе разработанных во второй главе марковской, полумарковской и имитационной моделей для оценки надежности технологической системы с учетом результатов оптимизации параметры её элементов.

ГЛАВА 4

ПРОГРАММНАЯ РЕАЛИЗАЦИЯ АЛГОРИТМА ОПТИМИЗАЦИИ ПРОЦЕССА МЕЛКОРАЗМЕРНОГО РЕЗЬБООБРАЗОВАНИЯ МЕТЧИКАМИ В ГЛУХИХ ГЛУБОКИХ ОТВЕРСТИЯХ

4.1 Исследование надежности технологической системы МРвГГО с учетом параметров потоков отказов и восстановлений (машинный эксперимент)

Блок схема выбора рациональных вариантов структур технологической системы для МРвГГО с учётом результатов экспериментальных исследований включает следующие основные этапы:

1. Определение количества структурных вариантов.
2. Ввод значений интенсивностей потоков отказов и восстановления.
3. Определение функций распределения по обобщенному закону Эрланга второго порядка.
4. Определение времени пребывания в состояниях.
5. Определение вероятностей переходов из состояния в состояние.
6. Выявление стационарного распределения вложенной цепи Маркова (ВЦМ).
7. Определение плотности распределения времени за счёт повторных попаданий по методу траекторий.
8. Определение критерия оптимальности.
9. Вычисление коэффициента простоя.
10. Анализ значения коэффициента простоя: $K_n \leq K_{n,\max}$.
11. Оценка возможности совершенствования результата, при утвердительной оценке происходит возврат на этап ввода значений интенсивностей, а при отрицательном – выполняется выход из алгоритма.

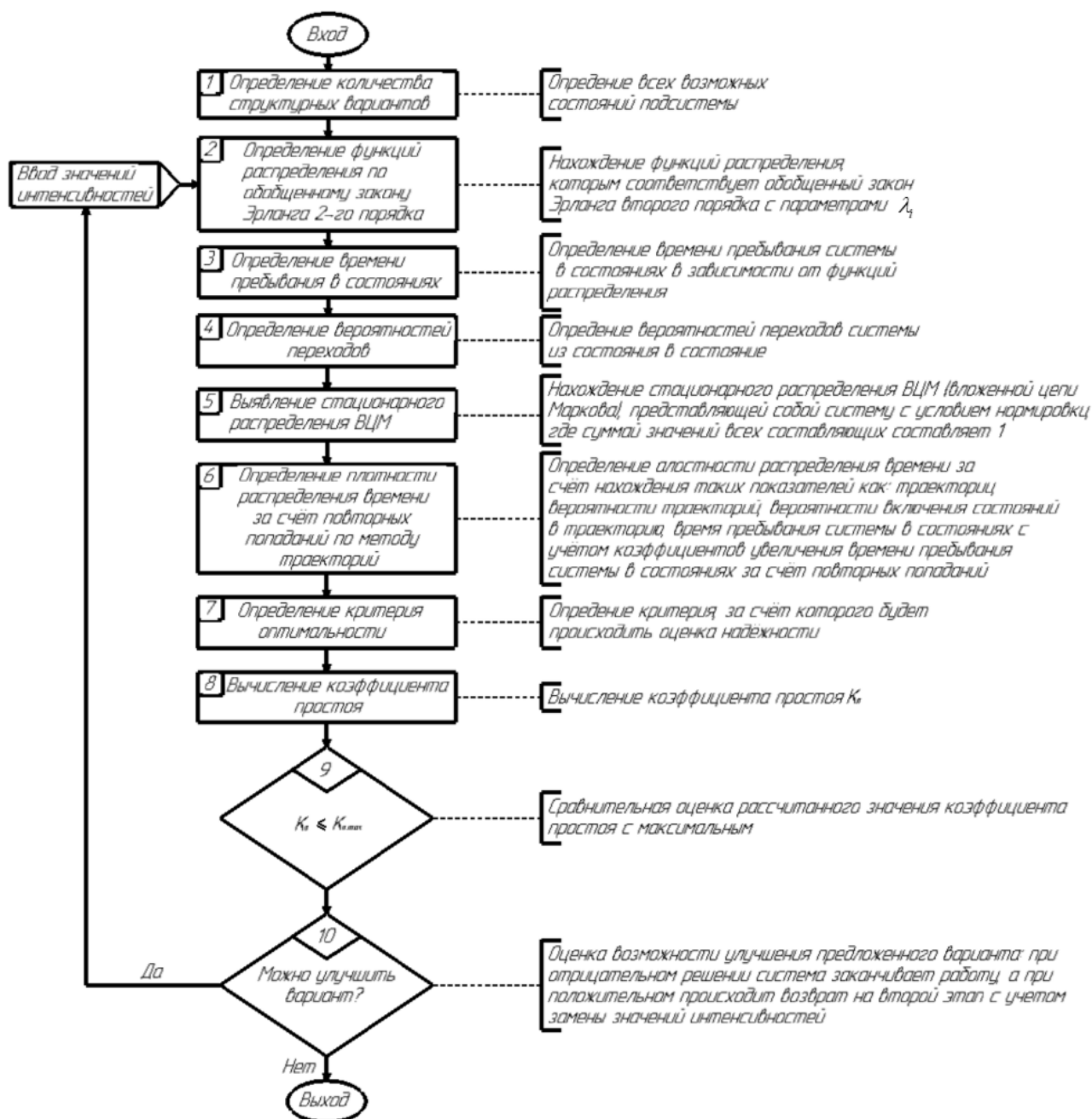


Рисунок 4.1.1 – Блок-схема выбора рациональных вариантов структур технологической системы для МРВГГО с учётом результатов экспериментальных исследований

Реализацию алгоритма проводили путем машинного эксперимента с использованием полученных значений результатов интенсивностей потоков отказов λ и восстановления μ (таблица 3.4.7) и на основе разработанных во второй главе моделей и размеченных графов состояний в марковской и в полумарковской системах. С помощью более точной полумарковской модели

получены значения коэффициентов простоя K_n (таблица 4.1.1) для трёх видов инструмента. Так, в результате машинной проверки из синтезированных вариантов по критерию минимального коэффициента простоя $K_n \rightarrow \min$ самый низкий показатель ($K_n = 0,333$) зафиксирован у режуще-деформирующих метчиков (I_3). Деформирующие (I_2) и режущие (I_1) метчики соответственно показали коэффициенты простоя K_n с большими величинами (0,389 и 0,396) (рисунок 4.1.2).

Таблица 4.1.1 – Значения коэффициентов простоя K_n , полученные в результате машинного эксперимента при МРвГГО

№ п/п	Метчик		Коэффициент простоя, K_n
1	Режущий	I_1	0,396
2	Деформирующий	I_2	0,389
3	Режуще-деформирующий	I_3	0,333

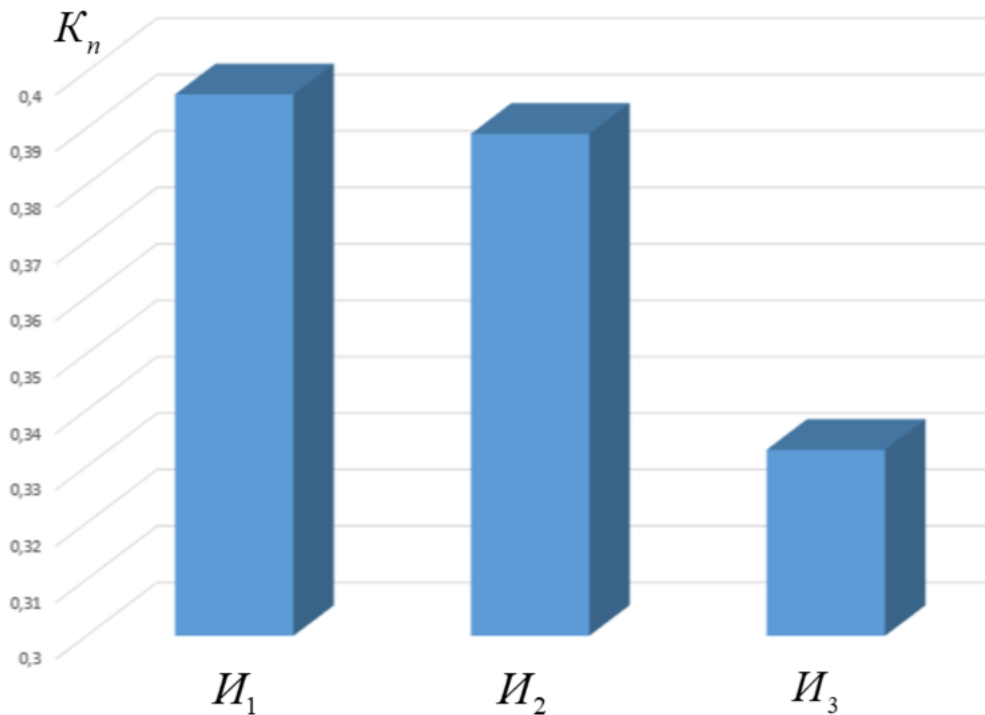


Рисунок 4.1.2 – Графики зависимостей коэффициентов простоя K_n от типа метчика при МРвГГО, полученные в результате машинного эксперимента

Также реализован алгоритм выбора рациональных вариантов структур технологической системы для МРвГГО путем машинного эксперимента с использованием полученных математических ожиданий наработок на отказ и времени восстановления (таблица 3.5.2) с применением разработанных во второй главе моделей и размеченных графов состояний в марковской и в полумарковской системах для способов подачи, марки материалов и видов инструмента при МРвГГО (таблица 4.1.2).

Машинный эксперимент показал, что из синтезированных вариантов по критерию минимального коэффициента простоя $K_n \rightarrow \min$ самый низкий показатель при обработке всех трех материалов (сталь 45, 34ХНЗМ, АЛ4) ($K_n = 0,205 \dots 0,168$) зафиксирован у режуще-деформирующих метчиков (I_3) при способе равномерной подачи, также самый низкий показатель при обработке всех трех материалов ($K_n = 0,199 \dots 0,166$) при способе прерывистой подачи, и еще более низкий – при обработке всех трех материалов ($K_n = 0,176 \dots 0,109$) при способе с циклической подачей с удалением стружки на каждом цикле (рисунок 4.1.3). Деформирующие (I_2) и режущие (I_1) метчики соответственно показали для всех указанных способов подачи и марок обрабатываемых материалов при МРвГГО существенно превосходящие по величине коэффициенты простоя K_n , что подтверждает преимущество режуще-деформирующих метчиков (I_3) по критерию минимального коэффициента простоя $K_n \rightarrow \min$ (таблица 4.1.2, рисунок 4.1.3).

При этом проведенный анализ (таблица 4.1.3) соотношения коэффициентов простоя K_n для разных способов подачи, материалов и видов инструмента при МРвГГО с величиной коэффициентов простоя K_{n3} для режуще-деформирующих метчиков (I_3) показывает, что по выбранному критерию режуще-деформирующие метчики (I_3) при мелкогабаритной резьбообработке отверстий в стальных заготовках эффективнее при способе

равномерной подачи в 2,04 раза, чем метчики режущие (I_1) и в 1,53 раза, чем деформирующие (I_2).

Таблица 4.1.2 – Значения коэффициентов простоя K_n , полученные в результате машинного эксперимента для способов подачи, марки материалов и видов инструмента при МРвГГО

№ п/п	Способ подачи	Материал	Коэффициент простоя, K_n		
			I_1	I_2	I_3
1.	Равномерная	Сталь 45	0,418	0,317	0,205
		34ХНЗМ	0,462	0,337	0,251
		АЛ4	0,410	0,286	0,168
2.	Прерывистая	Сталь 45	0,403	0,309	0,199
		34ХНЗМ	0,446	0,330	0,243
		АЛ4	0,395	0,279	0,166
3.	Циклическая с удалением стружки на каждом цикле	Сталь 45	0,377	0,284	0,176
		34ХНЗМ	0,414	0,314	0,206
		АЛ4	0,370	0,238	0,109

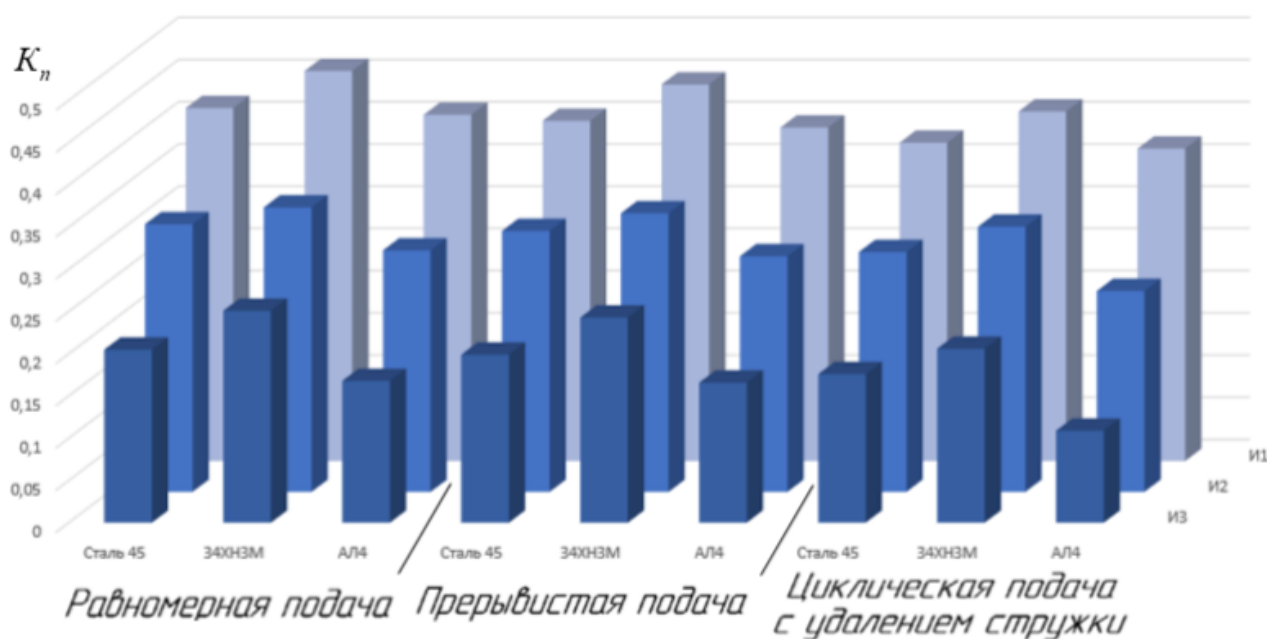


Рисунок 4.1.3 – Графики зависимостей коэффициентов простоя K_n от способов подачи, марки материалов и видов инструмента при МРвГГО, полученные в результате машинного эксперимента

Таблица 4.1.3 – Соотношения коэффициентов простоя K_n для разных способов подачи, материалов и видов инструмента при МРвГГО с величиной коэффициентов простоя K_{n3} для режущо-деформирующих метчиков (I_3)

№ п/п	Способ подачи	Материал	Соотношения коэффициентов простоя, K_n		
			I_1	I_2	I_3
1.	Равномерная	Сталь 45	$2,04K_n^{P_{31}}$	$1,53K_n^{P_{31}}$	$K_n^{P_{31}}$
		34ХНЗМ	$1,84K_n^{P_{32}}$	$1,34K_n^{P_{32}}$	$K_n^{P_{32}}$
		АЛ4	$2,44K_n^{P_{33}}$	$1,7K_n^{P_{33}}$	$K_n^{P_{33}}$
2.	Прерывистая	Сталь 45	$2,03K_n^{II_{31}}$	$1,55K_n^{II_{31}}$	$K_n^{II_{31}}$
		34ХНЗМ	$1,84K_n^{II_{32}}$	$1,36K_n^{II_{32}}$	$K_n^{II_{32}}$
		АЛ4	$2,38K_n^{II_{33}}$	$1,68K_n^{II_{33}}$	$K_n^{II_{33}}$
3.	Циклическая с удалением стружки на каждом цикле	Сталь 45	$2,14K_n^{U_{31}}$	$1,61K_n^{U_{31}}$	$K_n^{U_{31}}$
		34ХНЗМ	$2,01K_n^{U_{32}}$	$1,52K_n^{U_{32}}$	$K_n^{U_{32}}$
		АЛ4	$3,39K_n^{U_{33}}$	$2,18K_n^{U_{33}}$	$K_n^{U_{33}}$

Также при равномерной подаче режущо-деформирующие метчики (I_3) при мелкоразмерной резьбообработке отверстий в заготовках из 34ХНЗМ эффективнее в 1,84 раза, чем метчики режущие (I_1) и в 1,34 раза, чем деформирующие (I_2), а при резьбообработке отверстий в заготовках из АЛ4 эффективнее соответственно в 2,44 раза, чем метчики режущие (I_1) и в 1,7 раз, чем деформирующие (I_2).

Для синтезированного варианта с прерывистой подачей режущо-деформирующие метчики (I_3) при мелкоразмерной резьбообработке отверстий в стальных заготовках эффективнее в 2,03 раза, чем метчики режущие (I_1) и в 1,55 раза, чем деформирующие (I_2). Также при прерывистой подаче режущо-деформирующие метчики (I_3) при мелкоразмерной резьбообработке отверстий в заготовках из 34ХНЗМ

эффективнее в 2,01 раза, чем метчики режущие (I_1) и в 1,36 раза, чем деформирующие (I_2), а при резьбообработке отверстий в заготовках из АЛ4 эффективнее соответственно в 2,38 раза, чем метчики режущие (I_1) и в 1,68 раз, чем деформирующие (I_2).

Для синтезированного варианта с циклической подачей с удалением стружки на каждом цикле режуще-деформирующие метчики (I_3) при мелкоразмерной резьбообработке отверстий в стальных заготовках эффективнее в 2,14 раз, чем метчики режущие (I_1) и в 1,61 раза, чем деформирующие (I_2). Также при циклической подаче режуще-деформирующие метчики (I_3) при мелкоразмерной резьбообработке отверстий в заготовках из 34ХН3М эффективнее в 2,01 раза, чем метчики режущие (I_1) и в 1,52 раза, чем деформирующие (I_2), а при резьбообработке отверстий в заготовках из АЛ4 эффективнее соответственно в 3,39 раза, чем метчики режущие (I_1) и в 2,18 раз, чем деформирующие (I_2).

Проведенный анализ на основе моделирования и обработки полученных экспериментальных данных показывает безусловное преимущество синтезированных структурных вариантов режуще-деформирующих метчиков (I_3) и нового способа МРвГГО с циклической подачей с удалением стружки на каждом цикле для каждого из трех марок выбранных представительных материалов по критерию минимального коэффициента простоя $K_n \rightarrow \min$. В частности, наиболее эффективное преимущество (от 2,18 до 3,39 раз) выявлено при обработке отверстий в заготовках из алюминиевого сплава АЛ4.

4.2 Экспериментальная проверка методики оптимизации процесса МРвГГО путем новой управляющей программы ЧПУ станком мод. MAXXmill 630

Проведенные в предыдущей главе качественная и количественная оценки свидетельствуют об адекватности теоретической модели нового

способа МРвГГО как перспективной составляющей технологической системы, позволяющей повысить эффективность процесса путем повышения качества обработки, а также эксплуатационной и технологической надежности рациональных вариантов метчиков, выявленных в процессе морфологического анализа. Разработанные методики и конструкция экспериментальной установки на станке мод. MAXXmill 630 с использованием установленной на рабочей поверхности стола специальной конструкции динамометра с поворотной платформой и тензодатчиком позволили оценить параметры потоков отказов функционирования и параметрических отказов, а также параметров потоков восстановления после соответствующих отказов при МРвГГО.

В этой связи целесообразно предложить рекомендации и провести разработку соответствующей управляющей программы ЧПУ для реализации на станке мод. MAXXmill 630 нового способа резбообразования с циклической подачей и удалением стружки на каждом цикле. В процессе экспериментальной проверки данного способа программа реализовывалась в тестовом режиме, а затем – в режиме покадровой отработки.

На рисунке 4.2.1, *а* обозначены координатные оси станка (Z – вертикальная, параллельная оси главного движения станка; X – горизонтальная продольная, перпендикулярна оси главного движения станка; Y – горизонтальная поперечная, перпендикулярна оси главного движения станка) и вращательные движения стола относительно осей Y (поворотная ось B) и Z (поворотная ось C), а также поворотная ось SP относительно оси Z , обозначающая главное движение – вращение электрошпинделя станка. Система координат – правовращающаяся, точка отсчета расположена в нулевой точке станка M . Контрольные точки (рисунок 4.2.1, *б*) на станке обозначены следующим образом:

- 1) нулевая точка станка M – находится точно в центре рабочего стола станка и является точкой отсчета системы координат;
- 2) нулевая точка инструмента W – может свободно программироваться

оператором, при этом исходная точка системы координат смещается с нулевой точки станка M на нулевую точку инструмента W ;

3) нулевая точка инструмента $N(T)$ – находится точно на пересечении оси шпинделя с фронтальной поверхностью шпинделя инструмента, с этого момента и далее будет описываться геометрия инструмента;

4) контрольная точка R – это фиксированная точка на станке, служащая для калибровки системы измерения, её необходимо проходить после каждого включения станка для проверки.

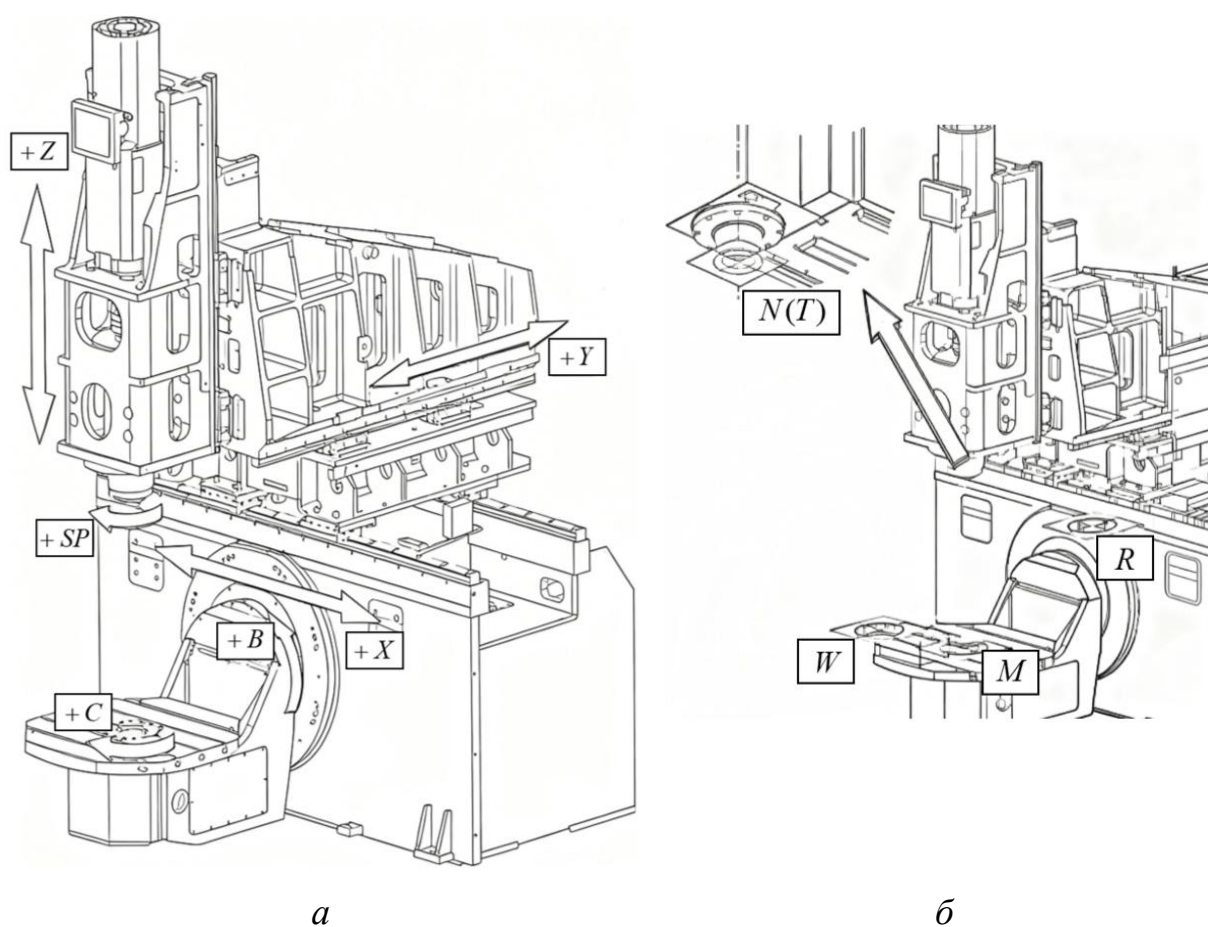


Рисунок 4.2.1 – Системы координат (а) станка мод. MAXXmill 630 и его контрольных точек (б)

Задача нового способа резбообразования на основе программного управления с циклической подачей и удалением стружки на каждом цикле для повышения качества обработки мелкогазмерных резб метчиком в глухих

глубоких отверстиях и обеспечения производительности из-за снижения числа поломок метчика и исключения пакетирования стружки в отверстиях решается предлагаемым режущо-деформирующим метчиком, снабженным зубьями обратного резания и получающим циклические движения ввинчивания и вывинчивания в обрабатываемое отверстие с подачей СОТС на инструмент. Каждый цикл i ввинчивания метчика с шагом резьбы P выполняют на длину рабочего хода $L_i = L_0 + i \cdot \Delta$, где L_0 – величина врезания метчика до начала непосредственной обработки, Δ – величина дополнительного ввинчивания $\Delta = (2...3)P$ метчика на каждом цикле, причем после каждого цикла ввинчивания метчика осуществляется его полное вывинчивание на длину L_{ei} вспомогательного хода, равную длине L_i соответствующего рабочего хода ($L_{ei} = L_i$). При этом на каждом вывинчивании в зоне врезания L_0 очищают рабочую поверхность метчика от остатков стружки посредством установленной на поверхности сопла для подачи СОТС перпендикулярно оси метчика контактирующей с его поверхностью щеточной насадкой. Необходимое количество циклов ввинчивания определяют по формуле $i = \frac{L}{\Delta}$, исходя из заданной длины обрабатываемой резьбы L отверстия.

Особенности нового способа изготовления мелкоразмерных резьб в глухих глубоких отверстиях с циклической подачей и удалением стружки на каждом цикле ранее представлены схемами на рисунках 3.3.1...3.3.3, где показана реализация способа.

Разработанная для реализации этого способа для резьбы М5 новая управляющая программа ЧПУ станком мод. MAXXmill 630 (таблицы 4.2.1 и 4.2.2) прошла необходимые тестовые проверки и пробные прогоны с последующей корректировкой выбранных значений.

Таблица 4.2.1 – Программа управления для реализации нового способа резьбообразования с циклической подачей и удалением стружки на каждом цикле для резьбы M5

Код программы	Расшифровка
; %_N_1001_MPF	Имя программы
N10 ; T="TAP_5" D=5 ZMIN=-20 - right hand tap	Комментарий: имя инструмента, диаметр метчика, длина нарезаемой резьбы, правосторонняя резьба
N11 WORKPIECE(,, "BOX", 112, 0, -50, 80, 12.5, 12.5, -12.5, -12.5)	Описание заготовки
N12 G90 G94	Абсолютное программирование координат, подача в мм/мин
N13 G71	Метрическая система
N15 G17	Плоскость обработки ХУ
N17 ; tap	Комментарий: резьба
N18 M9	СОЖ отключена
N19 T="TAP_5" D1	Подготовка инструмента к смене по имени «TAP_5» и включение коррекции
N20 M6	Смена инструмента
N21 S500 M3	Включение шпинделя: 500 об/мин, вращение по часовой стрелке
N22 G54	Включение заданного программного ноля (ноль заготовки)
N23 G0 X0 Y0	Ускоренное перемещение в точку с координатами X0 Y0
N24 G0 Z15	N24 G0 Z15 – Ускоренное перемещение в точку с координатами Z15
N25 M8	Включение СОТС
N26 G17	
N27 MCALL CYCLE84(100, 0, 10, 17, 0, 5, 0.8, 0, 500, 500, 0, 1, 0, 2, 0.8, 1.4, «ISO_METRIC», M5, 1001, 1001001)	Цикл
N28 X0 Y0	Позиционирование
N29 MCALL	Возврат M17/M99
N30 G0 Z15	Перемещение в Z15
N32 M30	Конец программы

Таблица 4.2.2 – Расшифровка общего вида цикла для реализации нового способа

Код программы	Расшифровка
Цикл в общем виде: CYCLE84 (RP, Z0, SC,, Z1, DT, SDE,, P, aS, S, SR, DT, 0, 1, 0, 2, D, V2, «ISO_METRIC», M5, 1001, 1001001)	
RP	Плоскость отвода (абс.)
Z0	Исходная точка (абс.)
SC	Безопасное расстояние (вводится аддитивно к исходной точке, без знака)
Z1	Глубина сверления = конечная глубина сверления (инкр.)
DT	Время ожидания на глубине сверления в секундах
SDE	Направление вращения после завершения цикла
P	Шаг резьбы как значение
aS	Позиция шпинделя для ориентированного останова шпинделя
S	Скорость шпинделя для нарезания внутренней резьбы
SR	Скорость шпинделя для отвода
0 (<_PITA>)	Параметр внутренний, Единица измерения шага резьбы, если значение «0», то шаг в мм
1 (<_TECHNO>)	Параметр внутренний, параметры точного останова, 1 = точный останов G601
0 (<_TECHNO>)	Параметр внутренний, предупреждение, 0 = активно с/без предупреждения как перед вызовом цикла
2 (<_TECHNO>)	Параметр внутренний, ускорение, 2 = без ограничения рывка BRISK
D	Макс. подача на глубину
V2	Величина отвода после каждой обработки (только при ломке стружки)
«ISO_METRIC»	Строка для таблицы резьб ("", "ISO", "BSW", "BSP", "UNC")
M5	Строка для выбора в таблице резьб (к примеру, "M 10", "M 12", ...)

Продолжение таблицы 4.2.2

1001 (<_DMODE>)	Параметр внутренний: 1 позиция (1) – 1 = G17 (активна только в цикле) 2 позиция (0): зарезервировано, 0 3 позиция (0): зарезервировано, 0 4 позиция (1): 1 = технологические параметры не отображаются: действует технология "как запрограммировано перед вызовом цикла" 5 позиция (0): 0 = Ввод: полный
1001001 (<_AMODE>)	Параметр внутренний: 1 позиция (1): глубина сверления = конечная глубина сверления Z1 (абс./инкр.), 1 = инкрементальная 2 позиция (0): зарезервировано, 0 3 позиция (0): зарезервировано, 0 4 позиция (1): направление вращения резьбы правое/левое, 1 = справа 5 позиция (0): зарезервировано, 0 6 позиция (0): зарезервировано, 0 7 позиция (1): величина отвода после каждой обработки V2 вручную/автоматически, 1 = автоматически (стандартное значение 1 мм/0,0394 дюйма)

Результаты проверки качества и размеров обработанной резьбы в детали после необходимой проведенной корректировки программы подтверждают её работоспособность и правильность в выборе управляющего цикла для реализации нового способа резьбообразования с циклической подачей и удалением стружки на каждом цикле при обработке на многооперационном станке мод. MAXXmill 630.

4.3 Перспективы внедрения результатов диссертационной работы в производство

Разработана общая модель формирования рациональной технологической системы, алгоритм обеспечения эффективности и точности, структурная схема процесса мелкогабаритного резбообразования в глухих глубоких отверстиях, позволившие с помощью морфологического анализа синтезировать из сформированного множества вариантов технологических систем рациональные структурные варианты.

На основе разработанных моделей и алгоритмов усовершенствован процесс формообразования мелкогабаритных резб в глухих глубоких отверстиях новым способом их изготовления с применением режуще-деформирующего метчика, снабженного зубьями обратного резания, получающего циклические движения ввинчивания в обрабатываемое отверстие и вывинчивания с подачей СОТС на инструмент (заявка на изобретение «Способ изготовления резб в глухих отверстиях» № 2025118732/05(044038) МПК В23G1/16 от 04.07.2025 г.).

Результаты диссертационной работы, в частности, исследований и практических рекомендаций, обеспечивающих повышение эффективности мелкогабаритного резбообразования в глухих глубоких отверстиях путем оптимизации цикла обоаботки внедрены на ООО «Локомотив Сервис Ростов». Проверена и внедрена методика определения режимных параметров резбообработки в глухих глубоких отверстиях в заготовках из легированных сталей и алюминиевых сплавов, позволяющая обеспечить надежность резбовых соединений. Представленные результаты и проведенные экспериментальные исследования позволили обеспечить заданное качество резбы в глухих отверстиях и увеличить стойкость инструмента в 2,0...2,5 раза по сравнению с известными методами нарезания резбы в глухих глубоких отверстиях. Разработанный на основе морфологического анализа и параметрического синтеза способ резбообразования в глухих глубоких

отверстиях на основе программного управления с циклической подачей и удалением стружки на каждом цикле режуще-деформирующим метчиком позволяет повысить показатели качества получаемых резьбовых поверхностей, исключить заклинивание и поломку мелкогабаритного метчика путем снижения величины максимального крутящего момента в 1,3 раза по сравнению с традиционным способом и равномерной подачей, повысить стойкость инструмента, а также, как следствие – технологическую и эксплуатационную надежность всей системы резьбообработки. Предполагаемый годовой экономический эффект от внедрения результатов исследований составил 1760000 рублей (приложение Г).

4.4 Выводы по разделу

1. Проведенный анализ на основе моделирования и обработки полученных экспериментальных данных показывает безусловное преимущество синтезированных структурных вариантов режуще-деформирующих метчиков (I_3) и нового способа МРвГГО с циклической подачей с удалением стружки на каждом цикле для каждого из трех марок выбранных представительных материалов по критерию минимального коэффициента простоя $K_n \rightarrow \min$. В частности, наиболее эффективное преимущество (от 2,18 до 3,39 раз) выявлено при обработке отверстий в заготовках из алюминиевого сплава АЛ4.

2. Разработанная для реализации нового способа для резьбы М5 управляющая программа ЧПУ станком мод. МАХХmill 630 прошла необходимые тестовые проверки и пробные прогоны с последующей корректировкой выбранных значений. Результаты проверки качества и размеров обработанной резьбы в детали после необходимой проведенной корректировки программы подтверждают её работоспособность и правильность в выборе управляющего цикла для реализации нового способа

резьбообразования с циклической подачей и удалением стружки на каждом цикле при обработке на многооперационном станке мод. MAXXmill 630.

3. На основе разработанных моделей и алгоритмов усовершенствован процесс формообразования мелкогазмерных резб в глухих глубоких отверстиях новым способом их изготовления с применением режуще-деформирующего метчика, снабженного зубьями обратного резания, получающего циклические движения ввинчивания в обрабатываемое отверстие и вывинчивания с подачей СОТС на инструмент (заявка на изобретение «Способ изготовления резб в глухих отверстиях» № 2025118732/05(044038) МПК В23Г1/16 от 04.07.2025 г.).

4. Результаты диссертационной работы, в частности, исследований и практических рекомендаций, обеспечивающих повышение эффективности мелкогазмерного резьбообразования в глухих глубоких отверстиях путем оптимизации цикла обоаботки внедрены на ООО «Локомотив-Сервис Ростов». Предполагаемый годовой экономический эффект от внедрения результатов исследований составил 1760 тыс. рублей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Исследованы причины снижения эффективности и точности формообразования внутренних резьб малых диаметров в деталях с глухими глубокими отверстиями, выявлены при этом недостаточно надежные с точки зрения эксплуатационных, параметрических отказов и переналаживаемости подсистемы и элементы.

2. Разработаны общая модель формирования технологической системы резьбообработки, алгоритм обеспечения эффективности и точности, структурная схема процесса мелкоразмерного резьбообразования в глухих глубоких отверстиях, позволившие с помощью морфологического анализа позволили синтезировать из сформированного множества вариантов технологических систем рациональные структурные варианты.

3. Разработаны математические модели в марковской и в полумарковской системах для оценки надёжности технологической системы мелкоразмерного резьбообразования в глухих глубоких отверстиях с учетом потоков отказов, восстановлений и переналадок элементов при помощи сравнения коэффициента простоя. Более точной признана полумарковская модель, которую целесообразно использовать для оптимизации процесса формообразования внутренней резьбы на основе совершенствования цикла обработки, конструкций инструмента и оборудования, так как она позволяет более точно оценить влияние времени нахождения инструмента в каждом из возможных состояний его подсистемы на надежность и производительность.

4. На основе морфологического анализа и структурно-компоновочного синтеза усовершенствован процесс формообразования мелкоразмерных резьб в глухих глубоких отверстиях новым способом их изготовления с применением режуще-деформирующего метчика, снабженного зубьями обратного резания, получающего циклические движения ввинчивания в обрабатываемое отверстие и вывинчивания с подачей СОТС на инструмент

(заявка на изобретение «Способ изготовления резьб в глухих отверстиях» № 2025118732/05(044038) МПК В23G1/16 от 04.07.2025 г.).

5. Выполнены экспериментальные исследования с помощью специальной установки на станке мод. MAXXmill 630 с использованием разработанной конструкции динамометра с поворотной платформой и тензодатчиком позволившие изучить параметры потоков отказов функционирования и параметрических отказов, а также параметров потоков восстановления после соответствующих отказов при МРвГГО. Для всех исследованных материалов при обработке режущо-деформирующими метчиками наблюдается возрастание величины наработки на отказ функционирования при переходе от способа резьбообразования с равномерной подачей к способу с циклической подачей и удалением стружки на каждом цикле в 1,14...1,22 раза при практически неизменяющемся времени восстановления ($M[T'_{BI}] = 1,9$ мин).

Для них также зафиксировано возрастание величины наработки на параметрический отказ при переходе от способа резьбообразования с равномерной подачей к способу с циклической подачей и удалением стружки на каждом цикле более в 1,25...1,89 раза при времени восстановления $M[T'_{BI}] = 1,3$ мин. Проведенные качественная и количественная оценки свидетельствуют об адекватности теоретической модели нового способа МРвГГО как перспективной составляющей технологической системы, позволяющей повысить эффективность процесса путем повышения качества обработки, а также эксплуатационной и технологической надежности рациональных вариантов метчиков, выявленных в процессе морфологического анализа.

6. Осуществлена проверка новых технических решений, в том числе машинный эксперимент, показавшие безусловное преимущество синтезированных структурных вариантов режущо-деформирующих метчиков (I_3) и нового способа МРвГГО с циклической подачей и удалением стружки

на каждом цикле для каждого из трех марок выбранных представительных материалов по критерию минимального коэффициента простоя $K_n \rightarrow \min$ ($K_n = 0,333$). В частности, наиболее эффективное преимущество по соотношению коэффициентов простоя K_n для разных способов подачи, материалов и видов инструмента при МРВГГО с величиной коэффициентов простоя для режуще-деформирующих метчиков (от 2,18 до 3,39 раз) выявлено при обработке отверстий в заготовках из алюминиевого сплава.

7. Результаты исследований внедрены на ООО «Локомотив-Сервис Ростов». Предполагаемый годовой экономический эффект от внедрения результатов исследований составил 1760 тыс. рублей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. А.с. № 1061947 SU. Станок для нарезания резьбы/ Канареев Ф.Н., Харченко А.О., А.М. Игнатов; заявитель и правообладатель Севастопольский приборостр. ин-т.; опубл. 23.12.1983.
2. А.с. № 630036 SU. Способ изготовления метчика/ Канареев Ф.Н., Харченко А.О., Сергеева Н.М.; заявитель и правообладатель Севастопольский приборостр. ин-т.; опубл. 30.10.1978.
3. А.с. SU 1061947А. МПК 23G 1/16. Станок для нарезания резьбы. Ф.Н. Канареев, А.О. Харченко, А.М. Игнатов. Заявка №3518248/25–08, 03.12.1982; 23.12.1983, Бюл. №47.
4. А.с. SU 927426. МПК В 23 G 5/06. Метчик. Ф.Н. Канареев, А.О. Харченко. Заявка № 2959403/25–08. 15.07.1980; 15.05.1982, Бюл. №18.
5. А.с. SU 952490. МПК В 23 G 5/06. Метчик. Ф.Н. Канареев, А.О. Харченко. Заявка № 3235250/25–08. 25.01.1981; 23.08.1982. Бюл. №31.
6. Агеев А.Д. Исследование процесса резьбонарезания мелкогабаритными твердосплавными метчиками в высокопрочных, термически обработанных материалах: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец. 05.02.08 «Технология машиностроения» / А.Д. Агеев. – М., 1971. – 21 с.
7. Акимов А.В. Прогрессивные конструкции инструментов для нарезания резьбы / Обзор иностранных изобретений / Акимов А.В., Багиров Р.В. – М.: Машиностроение, 1966. – 66 с.
8. Байхельт Ф., Франкен П. Надежность и техническое обслуживание. Математический подход. Пер. с нем. М.: Радио и связь, 1988. 392 с.
9. Барзилович Е.Ю. Модели технического обслуживания сложных систем: Учеб. пособие для вузов. – М.: Высш. шк., 1982. 231 с.
10. Беляев В.Н. Повышение производительности комбинированной обработки растачиванием и раскатыванием отверстий в деталях из алюминиевого сплава путем оптимизации режимных параметров: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.03.01/ Беляев Вячеслав Николаевич. – Бийск, 2006. – 20 с.

11. Беляев М.С. Надежность и долговечность машин. / Беляев М.С. – К.: Техника, 1973. – 120 с.
12. Блинов Р.М. Исследование причин заклинивания метчика в процессе нарезания резьбы в глухих отверстиях/ Р.М. Блинов // СТИН. – 2005. – №6. – С.8 – 14.
13. Блинов Р.М. Разработка способов удаления стружки при соответствующем управлении ее формой с целью повышения надежности работы метчиков при нарезании резьб в глухих отверстиях: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.03.01/ Блинов Роман Михайлович. – М., 2005. – 20 с.
14. Блинов Р.М. Экспериментальное исследование процесса стружкообразования при нарезании резьбы в глухих отверстиях/ Р. М. Блинов, О.И. Аверьянов, И.О. Аверьянова // СТИН. – 2005. – №3. – С.34 – 42.
15. Бобров В.Ф. Основы теории резания металлов/ Бобров В.Ф. – М.: Машиностроение, 1975. – 334 с.
16. Боярунас А.М. Выдавливание внутренних резьб бесстружечными метчиками/ А.М. Боярунас. – М.: НИИМАШ, 1976. – 54 с.
17. Братан С.М. Повышение точности формообразования мелкоразмерных резьб метчиками в алюминиевых сплавах: монография / С.М. Братан, Ф.Н. Канареев, П.А. Новиков, А.О. Харченко. – М.: Вузовский учебник: ИНФРА-М, 2017. – 164 с.
18. Братан, С. М. Обеспечение точности формообразования мелкоразмерных резьб в глухих глубоких отверстиях с позиций системного анализа / С. М. Братан, А. О. Харченко, Н. Ю. Мирзоян // Ученые записки Крымского инженерно-педагогического университета. – 2024. – № 4(86). – С. 279-286.
19. Бурыкин И.П. Исследование влияния геометрических параметров метчиков-накатников для внутренних резьб М8-М12 на качество резьбы, производительность и динамику процесса накатывания/ И.П. Бурыкин. –М.: НИИМАШ, 1968, –267 с.

20. Гибкое автоматическое производство / под общ. ред. С.А. Михайорова, Г.В. Орловского и С.Н. Халкиопова. – Л.: Машиностроение, 1985. – 454 с.
21. Гнеденко Б.В. Математические методы в теории надежности / Гнеденко Б.В., Беляев Ю.К., Соловьев А.Д. – М.: Наука, 1965. – 524 с.
22. Горбунов А.А. Корректированные метчики малого диаметра для труднообрабатываемых материалов/ А.А. Горбунов// СТИН. – 1975. –№12. – С. 14 – 15.
23. ГОСТ 1050-2013.Metalлопродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. – Взамен ГОСТ 1050-88 и ГОСТ 4543-71; введ. 2015 – 01 – 01. – М.: Стандартиформ. – 32 с.
24. ГОСТ 1583-93. Сплавы алюминиевые литейные. Технические условия. – Взамен ГОСТ 1583-89; введ. 1997 – 01 – 01. – М.: Межгосударственный совет по стандартизации, метрологии и сертификации. – 24 с.
25. ГОСТ 16093-2004. Основные нормы взаимозаменяемости. Резьба метрическая. Допуски. Посадки с зазором. – Взамен ГОСТ 16093-81; введ. 2005 – 07 – 01. – М.: Стандартиформ. – 45 с.
26. ГОСТ 24705-2004. Основные нормы взаимозаменяемости. Резьба метрическая. Основные размеры. – Взамен ГОСТ 24705-81; введ. 2005 – 07 – 01. – М.: Стандартиформ. – 16 с.
27. ГОСТ 5632-2014. Легированные нержавеющие стали и сплавы коррозионно-стойкие, жаростойкие и жаропрочные. Марки. – Взамен ГОСТ 5632-72; введ. 2015 – 01 – 01. – М.: Стандартиформ. – 49 с.
28. ГОСТ 8724-2002. Основные нормы взаимозаменяемости. Резьба метрическая. Диаметры и шаги. – Взамен ГОСТ 8724-81; введ. 2004 – 01 – 01. – М.: Стандартиформ. – 9 с.
29. ГОСТ 9150-2002. Основные нормы взаимозаменяемости. Резьба метрическая. Профиль. – Взамен ГОСТ 9150-81; введ. 2004 – 01 – 01. – М.: Стандартиформ. – 4 с.

30. Григорьян Г.Д. Точность, надежность и производительность металлорежущих станков / [Григорьян Г.Д., Зелинский С.А., Оборский Г.А. и др.]. – К.: Тэхника, 1990. – 222 с.
31. Григорьян Г.Д. Элементы надежности технологических процессов. / Григорьян Г.Д. – Киев-Одесса: Вища школа, 1984. – 214 с.
32. Грудов А.А. Влияние скорости резания и износа метчиков на крутящий момент/ А.А. Грудов // СТИН. – 1963. – № 1. – С.13.
33. Грудов А.А. Высокопроизводительный резьбообразующий инструмент/А.А. Грудов, П.И. Комаров. – М.: НИИМАШ, 1980. – 64 с.
34. Грудов А.А. Исследование стойкости метчиков и точности нарезания резьбы: автореф. дис. на соискание учен. степени канд. техн. наук: спец 05.02.08 «Технология машиностроения» / А.А. Грудов. – М., 1971. – 22 с.
35. Грудов А.А. Некоторые вопросы эксплуатации метчиков/ А.А. Грудов// Резьбообразующий инструмент. – М.: НИИМАШ, 1968. – С.77 – 99.
36. Грудов А.А. Оптимальная геометрия метчиков и режимов резания при нарезании резьб в углеродистой стали/ А.А. Грудов. – М.: ЦИТЭШ, 1960. – С.29-31.
37. Грудов А.А. Пути увеличения точности нарезаемой резьбы и стойкости метчиков/А.А. Грудов. – М.: МСИП, ВНИИ, 1966. – 128 с.
38. Дальский А.М. Технологическое обеспечение надежности высокоточных деталей машин. / Дальский А.М. – М.: Машиностроение, 1975. – 224 с.
39. Дунин-Барковский И.В. Измерение и анализ шероховатости, волнистости и некруглости поверхности / И.В. Дунин-Барковский, А.Н. Карташова. – М.: Машиностроение, 1978. – 232 с.
40. Евстегнеева О.Н. Исследование способов снижения влияния причин поломок метчиков при работе в глухих отверстиях/ О.Н. Евстегнеева// Инновации в машиностроении: сб. научн. тр. – Пенза, 2002. – С. 144 – 146.

41. Евстегнеева О.Н. Обеспечение надежности резьбонарезания метчиком в глухих отверстиях/ О.Н. Евстегнеева// Технология, экономика и организация производства технических систем: сб. научн. тр. – Москва, 2003. – С. 12 – 18.
42. Екельчик А.Л. Корректированные метчики / Екельчик А.Л., Наумов И.И. – Авиационная промышленность – 1951. – №38. – С.21–23.
43. Екельчик А.Л. Корректированные метчики / Екельчик А.Л., Наумов И.И. – Информационно-технический бюллетень – 1956. – №2.
44. Житницкий С.И. Износ и стойкость инструмента для накатывания внутренних резьб/ С.И. Житницкий, О.С. Андрейчиков// СТИН. – 1967. – № 3. – С. 38 – 39.
45. Зайчиков В.В. Теоретическое исследование вибраций при нарезании метчиками/ В.В. Зайчиков, И.Г. Жарков, В.М. Маркушин// Обработка высокопрочных сталей и сплавов инструментами из сверхтвёрдых и синтетических материалов: сб. научн. тр. – Куйбышев: КУАИ, 1980. – С. 74 – 79.
46. Заморёнов М.В., Копп В.Я., Заморёнова Д.В. Метод моделирования регенерирующих систем. // Математическое моделирование. 2018. Т. 30. № 6. С. 134-144.
47. Заморёнов М.В., Копп В.Я., Заморёнова Д.В., Владимирова Е.С. Моделирование процесса функционирования облачной системы хранения данных методом траекторий// Автоматизация и измерения в машино-приборостроении. – 2020. – Т. 9. – №1. – С. 28-39.
48. Захаренко И.Л. Испытание различных смазывающе-охлаждающих жидкостей при работе гаечными метчиками/ И.Л. Захаренко. – М.: ВНИИ, 1960. – 37 с.
49. Зорев Н.Н. Нарезание резьб быстрорежущими метчиками в деталях из жаропрочной аустенитной стали типа ЭИ69 / Зорев Н.Н. // Котлобуростроение – 1950. – №3. – С.14–17.
50. Ильюшин А. А. Механика сплошной среды. — М.: Изд-во Моск. ун-та, 1978. — 287 с.

51. Исследование точностных характеристик внутренних резьб и технологической надёжности метчиков с учётом потоков параметрических отказов / Н. Ю. Мирзоян, А. О. Харченко, М. В. Заморенов, Д. В. Моисеев // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2025. – № 12. – С. 557-566.
52. Канареев Ф.Н. Влияние деформаций кручения рабочей части метчиков на точность внутренних резьб малых диаметров (М2...М6)/ Ф.Н. Канареев // Вестник СевНТУ. Сер. Машиноприборостроение и транспорт: сб. науч. тр. — Севастополь, 2010. – Вып. 107. – С. 81 – 88.
53. Канареев Ф.Н. Исследование напряжений на рабочих поверхностях зубьев метчиков малых диаметров/ Ф.Н. Канареев, Л.Б. Шрон, С.В. Шистеров// Приборостроение. – К.: Техника, 1986. – Вып. 39. – С. 40.
54. Канареев Ф.Н. Новые конструкции деформирующих метчиков/ Ф.Н. Канареев // Вестник СевНТУ. Сер. Машиноприборостроение и транспорт: сб. науч. тр. — Севастополь, 2010. – Вып. 108. – С. 41 – 46.
55. Капур К. Надёжность и проектирование систем / К. Капур, Л. Ламберсон. – М.: Мир, 1980. – 174 с.
56. Катковник В.Я. Вопросы теории и техники гибких автоматизированных производственных систем / В.Я. Катковник // Труды ЛПИ: сб. науч. тр. – 1984. – №400. – С.58-62.
57. Клушин М.И. Смазочно-охлаждающие жидкости при резании металлов и техника их применения/ М.И. Клушин. – М.: Машгиз, 1961. – 292 с.
58. Копп В.Я, Обжерин Ю.Е., Песчанский А.И. Стохастические модели автоматизированных производственных систем с временным резервированием. Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2000. 284 с.
59. Копп В.Я. Моделирование автоматизированных производственных систем: Монография. – Севастополь: СевНТУ, 2012. 700с.
60. Копп В.Я., Заморёнов М.В., Обжерин Ю.Е., Ларин М.Ю. Использование метода траекторий для построения полумарковской модели структуры "Технологическая ячейка – Накопитель" // Научно-технические ведомости

Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. Информатика. Телекоммуникации. Управление. – 2016. – Т. 247. – №3. – С. 23-34.

61. Копп В.Я., Обжерин Ю.Е., Песчанский А.И. Моделирование автоматизированных линий. Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2006. 240 с.

62. Королюк В.С. Стохастические модели систем. Отв. ред. А.Ф. Турбин. Киев: Наукова думка, 1989. 208 с.

63. Королюк В.С. Суперпозиция процессов марковского восстановления // Кибернетика. 1981. №4. С. 121 – 124.

64. Королюк В.С., Турбин А.Ф. Полумарковские процессы и их приложения. К.: Наук. Думка, 1976. 181 с.

65. Королюк В.С., Турбин А.Ф. Процессы марковского восстановления в задачах надежности систем. Киев: Наукова думка, 1982. 236 с.

66. Красновид Д.О. Підвищення працездатності мітчиків для обробки титану та титанових сплавів: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.03.01/ Красновид Дмитро Олександрович. – К., 2010. – 20 с.

67. Кузнецов В.П. Определение погрешности параметра винтового движения метчика при работе/ В.П. Кузнецов // Известия Тульского государственного университета. Сер. Машиностроение. – Тула: ТГУ, 1998. – Вып.2. – С. 60 – 67.

68. Левин А.И. Математическое моделирование в исследованиях и проектировании станков / Левин А.И. – М.: Машиностроение, 1978. – 184 с.

69. Маталин А.А. Точность механической обработки и проектирование технологических процессов / Маталин А.А. – Л.: Машиностроение, 1970. – 380 с.

70. Матвеев В.В. Надежность резьбонарезных операций/ В.В. Матвеев// Отделочно-чистовые методы обработки и инструменты в технологии машиностроения: сб. науч. тр. – Барнаул, 1984. – Вып. №15. – С. 3 – 5.

71. Матвеев В.В. Нарезание точных резьб / В.В. Матвеев. – М.: Машиностроение, 1978. – 88 с.

72. Матвеев В.В. Нарезание точных резьб/ В.В. Матвеев. – М.: Машиностроение, 1968. – 116 с.
73. Матвеев В.В. Повышение работоспособности машинных метчиков при нарезании точных резьб на агрегатных станках/ Матвеев В.В.// Организация процессов обработки металлов резанием: сб. научн. труд. – Москва, 1961. – Вып. 28. – С. 15.
74. Меньшаков В.М. Бесстружечные метчики / Меньшаков В.М., Урлапов Г.П., Середа В.С. – М.: Машиностроение, 1981. – 479 с.
75. Меньшаков В.М. Определение максимальной величины разбивания среднего диаметра резьбовых отверстий, образованных бесстружечными метчиками/ В.М. Меньшаков и [др.]/ Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки: сб. научн. труд. – Челябинск, 1982. – Вып. 32. – С.156 – 159.
76. Методические указания к лабораторной работе «Изучение многооперационного обрабатывающего центра мод. MAXXmill 630» / Разраб. А.О. Харченко и др. – Севастополь: СевГУ, 2023. 39 с.
77. Мирзоян, Н. Ю. Анализ надежности инструмента при мелкокоразмерном внутреннем резьбонарезании метчиком / Н. Ю. Мирзоян, М. В. Замоленов, А. О. Харченко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 9. – С. 625-628.
78. Мирзоян, Н. Ю. Анализ надёжности системы станка при мелкокоразмерном резьбонарезании в глухих отверстиях / Н. Ю. Мирзоян, А. О. Харченко, М. В. Замоленов // Транспортное машиностроение. – 2025. – № 5(41). – С. 4-14.
79. Мирзоян, Н. Ю. Имитационная модель для анализа надежности инструмента при резьбонарезании метчиком в глухих отверстиях / Н. Ю. Мирзоян, М. В. Замоленов, А. О. Харченко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 10. – С. 38-40.

80. Мирзоян, Н. Ю. Надёжность инструмента при резьбонарезании в глухих отверстиях / Н. Ю. Мирзоян, А. О. Харченко // Вестник современных технологий. – 2024. – № 3(35). – С. 13-18.
81. Мирзоян, Н. Ю. Синтез технологической системы мелкоразмерной резьбообработки в глухих глубоких отверстиях на основе морфологического анализа / Н. Ю. Мирзоян, А. О. Харченко // Вестник современных технологий. – 2025. – № 1(37). – С. 4-11.
82. Мирзоян, Н. Ю. Синтез технологической системы мелкоразмерной резьбообработки в глухих отверстиях на основе морфологического анализа / Н. Ю. Мирзоян, А. О. Харченко // Автомобилестроение: проектирование, конструирование, расчет и технологии ремонта и производства: материалы IX Всероссийской научно-практической конференции (Ижевск, 25–26 апреля 2025 г.) / [под ред. Н. М. Филькина]. – Ижевск: Изд-во УИР ИжГТУ имени М. Т. Калашникова, 2025. – (621 с.) – С.286-293.
83. Миропольский Ю.А. Накатывание резьб и профилей/ Ю.А. Миропольский, Э.П. Луговой// – М: Машиностроение, 1976. – 214 с.
84. Нарезание внутренней резьбы: Технология производства работ, – Москва: VTMstol.ru. 02.06.2022. (электронный ресурс).
85. Нахапетян Е.Г. Диагностирование оборудования гибкого автоматизированного производства / Нахапетян Е.Г. – М.: Наука, 1985. – 146 с. 77.
86. Наянзин Н.Г. Системное проектирование гибких производственных систем: Обзор / Наянзин Н.Г. – М.: НИИмаш, 1984. – 66 с.
87. Новоселов Ю.К. Выбор информационного сигнала для диагностирования процесса формообразования внутренних резьб малого диаметра М2-М6/ Ю.К. Новоселов, Ф.Н. Канареев, П.А. Новиков//Високі технології в машинобудуванні. зб. наук. праць ХДПУ, -Харків, 2008 – Вип. 1(2) - С. 277–286.
88. Новоселов Ю.К. Теория технических систем/ Ю.Н. Кузнецов, Ю.К. Новоселов, И.В. Луцев. – Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2010. – 252с.

89. Палей С.М. Оптимизация резерва режущих инструментов при непрерывном контроле их работоспособности / С.М. Палей, О.Ф. Пославский // Вестник машиностроения. – 1986. – №1 – С. 49–52.
90. Пат. № 50458 RU. Комбинированный инструмент для резания и поверхностного пластического деформирования / Фирсов А.М., Беляев В.Н. Оpub. в Б.И., 2006, № 2.
91. Пат. № 86343 UA. Резьбонарезной патрон/ Канареев Ф.Н., Новиков П.А.; заявитель и правообладатель Севастопольский нац. техн. ун-т.; опубл. 27.04.09г.
92. Подураев В.Н. Резание труднообрабатываемых материалов/ В.Н. Подураев. – М.: Высшая школа, 1974. – 587 с.
93. Прогрессивные режущие инструменты и режимы резания металлов: Справочник/ В.И. Баранников [и др]; под общ. ред. В.И. Баранникова. – М.: Машиностроение, 1990. – 400 с.
94. Проников А.С. Металлорежущие станки и автоматы / Проников А.С. – М.: Машиностроение, 1976 г. – 167 с.
95. Проников А.С. Точность и надежность станков с числовым программным управлением / Проников А.С. – М.: Машиностроение, 1982 г. – 246 с.
96. Пуш В.Э. Автоматические станочные системы / Пуш В.Э., Пигерт Р., Сосонкин В.Л. – М.: Машиностроение, 1982. – 319 с.
97. Пуш В.Э. Оценка оптимальности решений при выборе автоматизированного оборудования / Пуш В.Э. // Станки и инструмент. – 1986. – №3. – С.3–5.
98. Райншке К., Ушаков И.А. Оценка надежности систем с использованием графов. М.: Радио и связь, 1988. 208 с.
99. Ратмиров В.А. Основы программного управления станками / Ратмиров В.А. – М.: Машиностроение, 1978. – 240 с.
100. Резников А.Н. Новая конструкция метчиков для обработки жаропрочных и титановых сплавов/ А.Н. Резников, Б.И. Пикалов, И.Г. Сарычев // СТИН. – 1973. – №9. – С. 19 – 21.

101. Решетов Д.Н. Надежность машин: учеб. пос. для машиностр. спец. вузов / Решетов Д.Н., Иванов А.С., Фадеев В.З.; под ред. Д.Н. Решетова. – М.: Высш. шк., 1988. – 238 с.
102. Родин П.Р. Metallорежущие инструменты: учебн. для вузов/ П.Р. Родин. – Киев.: Вища школа, 1979. – 432 с.
103. Рыжов Э.В. Раскатывание резьб/ Э.В. Рыжов, О.С. Андрейчиков, А.Е. Стешков. – М.: Машиностроение, 1974. – 122 с.
104. Сергиевский Л.В. Наладка, регулировка и испытание станков с программным управлением / Сергиевский Л.В. – М.: Машиностроение, 1974. – 342 с.
105. Середа В. С. Резьбы и резьбовые соединения. — М.: Литрес, 2020. — 256 с.
106. Смирнов А.П. Повышение эффективности процесса накатывания малоразмерных резьб в глубоких отверстиях деталей из труднообрабатываемых материалов: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.03.01/ Смирнов Александр Павлович. – Н.-Новгород, 2002. – 20 с.
107. Справочник технолога-машиностроителя. В 2-х т. Т. 2 / Под ред. А.Г. Косиловой и Р.К. Мещерякова – М.: Машиностроение, 1985. – 496 с.
108. Таратынов О.В. Анализ факторов, влияющих на надежность работы метчиков/ О.В. Таратынов, О.И. Аверьянов, С.А. Толмачев// СТИН. –1999. – №8. – С. 45 – 49.
109. Таратынов О.В. Повышение надежности нарезания резьб метчиками за счет совершенствования их конструктивных параметров/ О.В. Таратынов, О.И. Аверьянов, С.А. Толмачев // Межвузовский сборник научных трудов. – М.: МГИУ, 1999. – С. 432 – 437.
110. Толмачев С.А. Повышение надежности работы метчиков при нарезании резьб в глухих отверстиях стальных деталей: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.02.08, 05.03.01/ Толмачев Сергей Алексеевич. - М., 2001. – 20 с.
111. Точность обработки и режимы резания/ Н.С. Колев. – М.: Машиностроение, 1976. – 145 с.

112. Урлапов Г.П. Инструмент для накатывания внутренних резьб / Урлапов Г.П., Меньшаков В.М., Середа В.С. – Станки и инструмент, 1969. – №10.
113. Урлапов Г.П. Исследование прочности бесстружечных метчиков/ Урлапов Г.П. и др.// Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки: сб. научн. трудов. – Челябинск, 1982. –Вып. 27. – с.160 – 167.
114. Фомичёв Д.С. Повышение эффективности процесса сверления и нарезания внутренней резьбы метчиками путем использования пластичных СОТС с трибоактивными присадками: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.03.01, 05.02.04/ Фомичёв Дмитрий Сергеевич. – Иваново, 2006. – 20 с.
115. Фрумин К.Л. Высокопроизводительный резьбообразующий инструмент / К.Л. Фрумин. – М.: Машиностроение, 1977. – 183 с.
116. Харченко А.О. Станки с ЧПУ и оборудование гибких производственных систем: учеб. пособ. для студентов вузов / Харченко А.О. – К.: ИД «Профессионал», 2004. – 304 с.
117. Харченко А.О., Братан С.М., Владецкая Е.А., Рощупкин С.И. Анализ и синтез структур современных многооперационных станков: практикум. М.: Центркаталог, 2018. – 144 с.
118. Харченко А.О., Братан С.М., Харченко А.А., Владецкая Е.А. Практикум по научно-исследовательской деятельности в машиностроении. М.: Центркаталог, 2022. 288 с.
119. Харченко А.О., Харченко А.А. Прогрессивные устройства и инструменты для мелкоразмерного резьбонарезания в отверстиях // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. Орел: ФГБОУ ВО «ОГУ имени И.С. Тургенева», № 2 (358). 2023. С. 35–41.
120. Шагун В.И. Влияние геометрических и конструктивных параметров машинных метчиков на размеры резьбы, нарезаемой в стали/ В.И. Шагун // Резьбообразующий инструмент: сб. научн. тр. – Москва, 1968. – Вып. 19. – С.151 – 158.

121. Шагун В.И. Влияние геометрических параметров машинных метчиков на размеры резьбы, нарезаемой в чугунах/ В.И. Шагун, Э.И. Фельдштейн// Автомобильная промышленность. – 1964. – № 5. – С. 37 – 40.
122. Шагун В.И. Исследование точности внутренних резьб, нарезаемых машинными метчиками: автореф. дис. канд. техн. наук: 05.03.01. / Владимир Иванович Шагун. - Минск, 1964. – 21 с.
123. Шагун В.И. К вопросу о влиянии скорости резания и смазывающе-охлаждающих жидкостей на размеры резьбы, нарезаемой метчиками/ В.И. Шагун/ Прогрессивная технология машиностроения: сб. научн. тр. – Минск.: Высшая школа, 1971. – Вып.2. – С. 161 – 164.
124. Шагун В.И. Точность резьбы и эксплуатация метчиков/ В.И. Шагун // Промышленность Белоруссии. – 1965. – № 4. – С.12 – 16.
125. Шифрин А.Т. Обработка резанием коррозионно-стойких, жаропрочных и титановых сплавов / Шифрин А.Т., Разницкий Л.М. – М.: Машгиз, 1964. – 255 с.
126. Шифрин А.Т. Обработка резанием нержавеющей сталей и сплавов / Шифрин А.Т. – Л.: Машгиз, 1957. – 126 с.
127. Экспериментальное исследование динамических процессов при формообразовании внутренних резьб в глухих глубоких отверстиях / Н. Ю. Мирзоян, А. О. Харченко, М. В. Заморенов [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2025. – № 12. – С. 515-524.
128. Эпштейн В.М. Твердосплавные метчики/ В.М. Эпштейн, В.Я. Рыбак, С.И. Диденко. – Киев.: Наукова думка, 1984. – 154 с.
129. Якухин В.Б. Оптимальная технология изготовления резьб / В.Б. Якухин. – М.: Машиностроение, 1985. – 184 с.
130. Dietz P. Baukasten systematik und methodisches. Konstruieren in werkzeugmaschinenbau / Dietz P. – Werkstatt und Betrieb, 1983. – №4. – St. 185–240.
131. Machine and Tool Blue Book. – 1985. – V.77, №5 – P. 62–71.

132. Merzlov A.V. Analiz osobennostey formoobrazovaniya vnutrennikh rez'b M2...M6 (Analysis of the features of the formation of inter-nal threads M2 ... M6) / A.V. Merzlov, A.O. Kharchenko // Sovremennyye tekhnologii: prob-lemy i perspektivy: sbornik statey Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii (20-23 maya 2019 g.), Sevastopol': FGAOU VO «SevGU», 2019. – S. 94-96.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Скетч для программирования Arduino UNO для реализации контроля крутящего момента $M_{кр}$ в процессе резьбообработки деталей метчиком

```
#include <HX711.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>

// Пины для HX711
const int LOADCELL_DOUT_PIN = 2;
const int LOADCELL_SCK_PIN = 3;

// Пин для SD карты
const int chipSelect = 4;

// Создаем объект HX711
HX711 scale;

// Параметры для расчета момента силы
const float LEVER_ARM = 0.13; // Плечо силы в метрах (настройте под вашу
установку)
const float GRAVITY = 9.81; // Ускорение свободного падения м/с²

// Калибровочные параметры
float calibration_factor = -1000; // Настройте под ваш датчик
float force = 0; // Сила в Ньютонах
float torque = 0; // Момент силы в Н*м

// Переменные для измерений
long raw_value = 0;
float weight_kg = 0; // Масса в килограммах

// Файл для записи данных
File dataFile;

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial) {
    delay(10);
  }
}
```

```

Serial.println("Система измерения момента силы с HX711");
Serial.println("=====");

// Инициализация HX711
scale.begin(LOADCELL_DOUT_PIN, LOADCELL_SCK_PIN);

// Ждем стабилизации АЦП
Serial.println("Ожидание стабилизации HX711...");
scale.set_scale();
scale.tare(); // Сброс на ноль

// Проверяем готовность HX711
if (scale.wait_ready_timeout(1000)) {
    Serial.println("HX711 готов к работе");
} else {
    Serial.println("HX711 не отвечает!");
    while(1);
}

// Установка калибровочного коэффициента
scale.set_scale(calibration_factor);

// Инициализация SD карты
if (!SD.begin(chipSelect)) {
    Serial.println("Ошибка инициализации SD карты!");
    return;
}
Serial.println("SD карта инициализирована");

// Создаем файл с заголовком
dataFile = SD.open("torque_data.csv", FILE_WRITE);
if (dataFile) {
    dataFile.println("Время(мс),Сырое_значение,Масса(кг),Сила(Н),Момент(Н*м)
,Плечо(м)");
    dataFile.close();
    Serial.println("Файл создан: torque_data.csv");
} else {
    Serial.println("Ошибка создания файла!");
}

// Вывод параметров системы
Serial.print("Плечо силы: ");

```

```

Serial.print(LEVER_ARM, 3);
Serial.println(" м");
Serial.print("Калибровочный коэффициент: ");
Serial.println(calibration_factor);
Serial.println("Система готова к работе");
Serial.println("-----");
}

```

```

void loop() {
  // Проверяем готовность данных
  if (scale.wait_ready_timeout(200)) {
    // Получаем сырое значение
    raw_value = scale.read();

    // Получаем массу в килограммах с применением калибровки
    weight_kg = scale.get_units(5); // Усреднение 5 измерений

    // Рассчитываем силу в Ньютонах ( $F = m * g$ )
    force = weight_kg * GRAVITY;

    // Рассчитываем момент силы ( $M = F * L$ )
    torque = force * LEVER_ARM;

    // Получаем текущее время
    unsigned long currentTime = millis();

    // Запись данных на SD карту
    dataFile = SD.open("torque_data.csv", FILE_WRITE);
    if (dataFile) {
      dataFile.print(currentTime);
      dataFile.print(",");
      dataFile.print(raw_value);
      dataFile.print(",");
      dataFile.print(weight_kg, 4);
      dataFile.print(",");
      dataFile.print(force, 4);
      dataFile.print(",");
      dataFile.print(torque, 4);
      dataFile.print(",");
      dataFile.println(LEVER_ARM, 3);
      dataFile.close();
    } else {
      Serial.println("Ошибка записи на SD карту!");
    }
  }
}

```

```

}

// Вывод в Serial для мониторинга
Serial.print("Время: ");
Serial.print(currentTime);
Serial.print(" мс | Масса: ");
Serial.print(weight_kg, 4);
Serial.print(" кг | Сила: ");
Serial.print(force, 4);
Serial.print(" Н | Момент: ");
Serial.print(torque, 4);
Serial.println(" Н*м");

} else {
  Serial.println("HX711 не готов");
}

delay(500); // Задержка между измерениями
}

// Функция для калибровки (может быть вызвана из Serial)
void calibrate() {
  Serial.println("=== КАЛИБРОВКА ===");
  Serial.println("Убедитесь, что датчик не нагружен и нажмите 't' для тарирования");

  while (!Serial.available()) {
    delay(100);
  }

  if (Serial.read() == 't') {
    scale.tare();
    Serial.println("Тарирование выполнено");
  }
}

```

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

Таблицы экспериментальных данных по суммарным крутящим моментам $M_{кр}$ в процессе мелкоразмерной резьбообработки в глухих глубоких отверстиях

Таблица Б.1 – Показатели значений суммарных крутящих моментов на метчиках в процессе обработки материала АЛ4 с помощью равномерной подачи

t, c	$M_{кр},$ $H / м$	t, c	$M_{кр},$ $H / м$	t, c	$M_{кр},$ $H / м$	t, c	$M_{кр},$ $H / м$	t, c	$M_{кр},$ $H / м$
0	0	0,311	0,260	0,498	0,364	0,720	0,209	0,941	0,045
0,026	0,034	0,312	0,282	0,499	0,350	0,721	0,185	0,942	0,039
0,065	0,065	0,325	0,291	0,510	0,353	0,733	0,175	0,964	0,042
0,066	0,071	0,337	0,277	0,511	0,336	0,734	0,162	0,984	0,029
0,077	0,097	0,338	0,267	0,526	0,342	0,751	0,174	1,010	0,018
0,087	0,117	0,347	0,274	0,527	0,329	0,752	0,151	1,011	0,009
0,089	0,122	0,348	0,245	0,544	0,335	0,766	0,157	1,036	0,019
0,107	0,131	0,361	0,236	0,545	0,321	0,767	0,142	1,053	0,013
0,122	0,140	0,373	0,252	0,556	0,325	0,780	0,146	1,068	0,016
0,123	0,124	0,374	0,262	0,557	0,308	0,790	0,135	1,069	0,007
0,136	0,109	0,375	0,265	0,568	0,293	0,802	0,128	1,077	0,013
0,147	0,124	0,376	0,288	0,577	0,299	0,804	0,116	1,084	0,018
0,148	0,135	0,377	0,296	0,578	0,267	0,805	0,100	1,104	0,017
0,161	0,132	0,390	0,284	0,592	0,274	0,825	0,089	1,105	0,008
0,179	0,182	0,391	0,310	0,593	0,252	0,826	0,082	1,128	0,016
0,192	0,201	0,400	0,305	0,607	0,246	0,843	0,085	1,138	0,007
0,216	0,176	0,401	0,325	0,620	0,240	0,844	0,079	1,157	0,013
0,217	0,206	0,414	0,318	0,621	0,206	0,845	0,069	1,158	0,006
0,228	0,206	0,424	0,335	0,632	0,194	0,858	0,069	1,184	0,011
0,229	0,229	0,437	0,320	0,644	0,191	0,859	0,058	1,199	0,004
0,230	0,237	0,449	0,300	0,655	0,185	0,874	0,051	1,220	0,007
0,244	0,235	0,450	0,349	0,657	0,207	0,887	0,044	1,235	0,003
0,245	0,255	0,462	0,345	0,666	0,217	0,903	0,055	1,236	0
0,263	0,267	0,463	0,359	0,667	0,224	0,915	0,060		
0,289	0,235	0,476	0,370	0,690	0,226	0,926	0,054		
0,299	0,267	0,486	0,349	0,708	0,219	0,940	0,053		

Таблица Б.2 – Показатели значений суммарных крутящих моментов на метчиках в процессе обработки материала АЛ4 с помощью прерывистой подачи

t, c	$M_{кр},$ $H / м$	t, c	$M_{кр},$ $H / м$	t, c	$M_{кр},$ $H / м$	t, c	$M_{кр},$ $H / м$	t, c	$M_{кр},$ $H / м$
0	0	1,537	0,005	2,959	0,127	4,378	0,202	6,151	0,075
0,168	0,031	1,551	0	2,967	0,134	4,407	0,207	6,185	0,128
0,169	0,039	1,575	0,009	2,996	0,151	4,441	0,194	6,218	0,121
0,193	0,035	1,599	0,005	3,018	0,146	4,465	0,196	6,411	0,229
0,217	0,056	1,771	0,057	3,020	0,158	4,494	0,178	6,429	0,224
0,250	0,068	1,773	0,066	3,039	0,152	4,523	0,181	6,430	0,238
0,275	0,075	1,804	0,061	3,058	0,161	4,595	0,106	6,467	0,231
0,307	0,072	1,806	0,086	3,068	0,165	4,629	0,109	6,469	0,256
0,308	0,080	1,829	0,084	3,100	0,165	4,663	0,083	6,515	0,248
0,375	0,089	1,830	0,097	3,102	0,160	4,720	0,061	6,517	0,267
0,376	0,079	1,863	0,092	3,143	0,170	4,744	0,065	6,543	0,262
0,418	0,073	1,864	0,107	3,145	0,166	4,783	0,037	6,546	0,273
0,419	0,064	1,902	0,103	3,179	0,181	4,817	0,041	6,573	0,267
0,458	0,068	1,903	0,114	3,203	0,176	4,870	0,006	6,574	0,274
0,477	0,062	1,969	0,109	3,220	0,179	4,898	0,010	6,575	0,278
0,500	0,065	1,970	0,124	3,222	0,170	4,899	0	6,603	0,273
0,501	0,056	1,987	0,122	3,314	0,155	5,014	0,037	6,604	0,292
0,524	0,058	1,989	0,148	3,352	0,138	5,020	0,041	6,632	0,301
0,525	0,053	2,051	0,137	3,386	0,144	5,033	0,050	6,633	0,283
0,558	0,055	2,052	0,153	3,405	0,119	5,067	0,041	6,662	0,292
0,559	0,032	2,100	0,137	3,453	0,126	5,149	0,138	6,693	0,296
0,591	0,036	2,128	0,142	3,454	0,109	5,168	0,128	6,695	0,282
0,592	0,018	2,129	0,129	3,501	0,099	5,207	0,171	6,727	0,287
0,616	0,022	2,172	0,134	3,502	0,076	5,236	0,164	6,729	0,270
0,617	0,017	2,211	0,113	3,553	0,080	5,313	0,202	6,782	0,277
0,660	0,013	2,240	0,117	3,555	0,061	5,341	0,191	6,830	0,245
0,698	0,005	2,264	0,113	3,600	0,050	5,342	0,216	6,849	0,251
0,723	0	2,288	0,101	3,631	0,042	5,371	0,208	6,893	0,210
0,766	0,009	2,314	0,104	3,632	0,030	5,387	0,224	6,917	0,217
0,790	0,004	2,317	0,091	3,664	0,033	5,395	0,231	6,979	0,132
0,843	0,025	2,351	0,076	3,666	0,023	5,419	0,224	7,004	0,139
0,867	0,023	2,382	0,072	3,699	0,005	5,442	0,233	7,071	0,095
0,867	0,045	2,383	0,061	3,738	0,008	5,443	0,246	7,095	0,072
0,909	0,040	2,384	0,055	3,762	0	5,470	0,251	7,124	0,076
0,910	0,060	2,430	0,061	3,824	0,017	5,472	0,231	7,182	0,043
0,938	0,054	2,432	0,050	3,849	0,013	5,508	0,235	7,206	0,047
0,939	0,063	2,452	0,041	3,862	0,022	5,510	0,228	7,249	0,023

Продолжение таблицы Б2

0,962	0,059	2,461	0,036	3,873	0,029	5,544	0,232	7,350	0,009
0,963	0,071	2,485	0,024	3,897	0,021	5,568	0,217	7,384	0,014
0,986	0,066	2,548	0,011	3,935	0,076	5,595	0,221	7,442	0,003
0,987	0,080	2,582	0,008	3,964	0,070	5,597	0,210	7,466	0,006
1,014	0,076	2,611	0,011	4,027	0,132	5,620	0,215	7,500	0,002
1,016	0,092	2,625	0	4,065	0,124	5,621	0,205	7,529	0,005
1,045	0,089	2,644	0,007	4,147	0,178	5,660	0,195	7,557	0,001
1,276	0,084	2,666	0,000	4,174	0,169	5,688	0,200	7,581	0,003
1,305	0,090	2,668	0,022	4,176	0,184	5,761	0,096	7,620	0
1,329	0,080	2,704	0,020	4,208	0,177	5,795	0,099		
1,372	0,069	2,707	0,041	4,210	0,193	5,828	0,069		
1,373	0,037	2,769	0,046	4,234	0,185	5,875	0,048		
1,401	0,042	2,770	0,052	4,259	0,197	5,876	0,031		
1,402	0,032	2,794	0,050	4,268	0,201	5,910	0,036		
1,440	0,023	2,876	0,104	4,325	0,204	5,968	0		
1,459	0,016	2,903	0,098	4,326	0,210	5,987	0,010		
1,484	0,018	2,904	0,119	4,357	0,218	6,011	0,002		
1,512	0,003	2,943	0,115	4,359	0,210	6,127	0,083		

Таблица Б.3 – Показатели значений суммарных крутящих моментов на метчиках в процессе обработки материала АЛ4 с помощью циклической подачи и удаления стружки на каждом цикле

t, c	$M_{кр},$ $H / м$	t, c	$M_{кр},$ $H / м$	t, c	$M_{кр},$ $H / м$	t, c	$M_{кр},$ $H / м$	t, c	$M_{кр},$ $H / м$
0	0	1,345	0,056	3,022	0,119	4,348	0,168	5,820	0,051
0,135	0,015	1,361	0,049	3,042	0,116	4,349	0,160	5,860	0,043
0,152	0,021	1,363	0,037	3,044	0,125	4,374	0,155	5,878	0,025
0,166	0,019	1,381	0,026	3,065	0,122	4,414	0,153	5,899	0,028
0,192	0,030	1,403	0,020	3,091	0,127	4,435	0,148	5,975	0,006
0,206	0,027	1,421	0,025	3,109	0,122	4,452	0,151	5,997	0
0,246	0,042	1,435	0,015	3,120	0,127	4,453	0,143	6,116	0,065
0,276	0,040	1,457	0,017	3,130	0,131	4,490	0,136	6,152	0,059
0,278	0,053	1,482	0,006	3,165	0,135	4,511	0,138	6,189	0,097
0,300	0,057	1,500	0,010	3,167	0,130	4,562	0,100	6,207	0,092
0,324	0,051	1,518	0,001	3,193	0,143	4,587	0,082	6,225	0,106
0,325	0,061	1,547	0,006	3,196	0,138	4,609	0,084	6,243	0,103
0,375	0,069	1,565	0	3,219	0,140	4,651	0,065	6,401	0,163
0,376	0,060	1,637	0,014	3,221	0,130	4,692	0,059	6,402	0,174
0,401	0,056	1,759	0,050	3,239	0,132	4,706	0,049	6,427	0,172
0,419	0,052	1,760	0,047	3,271	0,122	4,735	0,051	6,429	0,179

Продолжение таблицы Б3

0,448	0,054	1,854	0,079	3,286	0,125	4,775	0,030	6,462	0,177
0,463	0,049	1,883	0,075	3,344	0,106	4,800	0,032	6,463	0,196
0,482	0,052	1,898	0,088	3,365	0,108	4,862	0,005	6,521	0,187
0,484	0,044	1,927	0,084	3,388	0,104	4,898	0,008	6,503	0,205
0,513	0,046	1,995	0,110	3,390	0,096	4,916	0	6,521	0,200
0,544	0,040	2,024	0,108	3,391	0,091	4,985	0,016	6,539	0,208
0,546	0,030	2,050	0,103	3,445	0,097	5,025	0,035	6,564	0,205
0,568	0,026	2,068	0,113	3,446	0,090	5,042	0,031	6,582	0,221
0,580	0,028	2,094	0,119	3,463	0,083	5,043	0,047	6,614	0,229
0,582	0,020	2,095	0,112	3,492	0,077	5,068	0,042	6,615	0,213
0,604	0,014	2,097	0,104	3,493	0,069	5,166	0,110	6,658	0,224
0,625	0,015	2,131	0,106	3,521	0,071	5,209	0,129	6,677	0,213
0,651	0,012	2,133	0,101	3,522	0,056	5,231	0,125	6,712	0,216
0,690	0,005	2,156	0,104	3,553	0,060	5,292	0,154	6,713	0,202
0,712	0	2,158	0,096	3,554	0,051	5,314	0,149	6,752	0,207
0,734	0,003	2,212	0,086	3,578	0,053	5,328	0,165	6,799	0,203
0,755	0,006	2,227	0,090	3,579	0,040	5,350	0,159	6,821	0,190
0,777	0,004	2,241	0,086	3,635	0,031	5,375	0,174	6,849	0,192
0,831	0,019	2,267	0,090	3,636	0,020	5,393	0,168	6,850	0,182
0,860	0,017	2,345	0,058	3,665	0,024	5,419	0,178	6,886	0,163
0,886	0,039	2,346	0,049	3,687	0,013	5,434	0,176	6,911	0,166
0,904	0,036	2,382	0,045	3,705	0,004	5,435	0,186	6,912	0,153
0,914	0,043	2,465	0,024	3,727	0,006	5,437	0,188	6,965	0,121
0,922	0,047	2,465	0,019	3,767	0	5,456	0,192	6,966	0,102
0,943	0,052	2,505	0,014	3,806	0,014	5,458	0,185	6,998	0,106
0,947	0,047	2,534	0,009	3,823	0,012	5,459	0,176	7,045	0,079
0,983	0,065	2,559	0,011	3,824	0,021	5,502	0,178	7,078	0,071
1,005	0,059	2,575	0,008	3,857	0,018	5,503	0,174	7,099	0,056
1,019	0,072	2,577	0,011	3,886	0,041	5,531	0,176	7,128	0,057
1,033	0,069	2,606	0,001	4,023	0,100	5,532	0,171	7,179	0,032
1,034	0,079	2,632	0,007	4,041	0,097	5,556	0,165	7,211	0,036
1,052	0,075	2,657	0	4,059	0,092	5,578	0,169	7,244	0,020
1,079	0,087	2,682	0,016	4,153	0,135	5,592	0,160	7,269	0,022
1,084	0,089	2,700	0,012	4,178	0,128	5,612	0,164	7,338	0,007
1,113	0,093	2,870	0,080	4,179	0,140	5,614	0,158	7,385	0,011
1,128	0,088	2,888	0,075	4,200	0,136	5,650	0,149	7,443	0,004
1,171	0,083	2,914	0,092	4,201	0,147	5,675	0,153	7,472	0,006
1,211	0,076	2,939	0,086	4,240	0,140	5,704	0,125	7,501	0,002
1,233	0,078	2,961	0,103	4,265	0,153	5,719	0,128	7,519	0,004
1,262	0,066	2,981	0,096	4,284	0,149	5,748	0,092	7,548	0,001
1,280	0,071	2,982	0,116	4,320	0,159	5,749	0,073	7,573	0,003
1,309	0,064	3,004	0,112	4,321	0,166	5,787	0,078	7,620	0

Таблица Б.4 – Показатели значений суммарных крутящих моментов на метчиках в процессе обработки материала – сталь 45 с помощью равномерной подачи

t, c	$M_{кр},$ $H / м$	t, c	$M_{кр},$ $H / м$	t, c	$M_{кр},$ $H / м$	t, c	$M_{кр},$ $H / м$	t, c	$M_{кр},$ $H / м$
0	0	0,296	1,202	0,504	1,666	0,714	1,083	1,048	0,067
0,027	0,176	0,302	1,177	0,505	1,620	0,725	1,062	1,056	0,054
0,065	0,337	0,303	1,231	0,516	1,666	0,741	1,005	1,071	0,111
0,071	0,318	0,312	1,217	0,527	1,687	0,749	1,020	1,079	0,071
0,081	0,470	0,313	1,306	0,528	1,614	0,751	0,972	1,092	0,090
0,088	0,456	0,335	1,340	0,538	1,635	0,760	0,920	1,100	0,052
0,089	0,554	0,344	1,277	0,539	1,532	0,773	0,934	1,110	0,100
0,098	0,596	0,346	1,238	0,556	1,572	0,774	0,744	1,121	0,082
0,119	0,564	0,355	1,263	0,557	1,499	0,787	0,776	1,132	0,096
0,111	0,640	0,356	1,212	0,573	1,524	0,805	0,677	1,139	0,038
0,128	0,692	0,368	1,242	0,574	1,465	0,813	0,702	1,157	0,088
0,147	0,592	0,375	1,227	0,583	1,482	0,822	0,602	1,164	0,021
0,159	0,665	0,384	1,375	0,584	1,421	0,839	0,441	1,174	0,040
0,166	0,638	0,394	1,321	0,592	1,455	0,848	0,456	1,184	0,071
0,174	0,784	0,395	1,434	0,593	1,336	0,857	0,393	1,193	0,017
0,180	0,769	0,403	1,417	0,603	1,382	0,869	0,416	1,198	0,071
0,189	0,882	0,405	1,516	0,611	1,235	0,870	0,311	1,206	0,054
0,198	0,859	0,415	1,493	0,623	1,260	0,880	0,334	1,213	0,067
0,208	0,928	0,431	1,553	0,617	1,158	0,881	0,247	1,214	0,013
0,219	0,853	0,440	1,532	0,629	1,183	0,909	0,201	1,226	0,036
0,221	0,976	0,441	1,480	0,630	1,141	0,914	0,245	1,227	0,017
0,229	0,941	0,447	1,497	0,640	1,156	0,933	0,284	1,244	0,033
0,230	1,024	0,448	1,478	0,641	1,093	0,947	0,247	1,245	0,013
0,231	1,083	0,458	1,589	0,649	1,054	0,956	0,263	1,257	0,023
0,242	1,074	0,460	1,608	0,665	1,028	0,976	0,171	1,272	0,010
0,251	1,194	0,470	1,589	0,672	1,080	0,991	0,199	1,282	0
0,262	1,223	0,471	1,628	0,675	1,102	1,002	0,142		
0,274	1,183	0,480	1,614	0,691	1,110	1,020	0,123		
0,285	1,194	0,490	1,666	0,699	1,079	1,034	0,088		
0,286	1,181	0,498	1,645	0,707	1,102	1,041	0,036		

Таблица Б.5 – Показатели значений суммарных крутящих моментов на метчиках в процессе обработки материала – сталь 45 с помощью прерывистой подачи

t, c	$M_{кр},$ $H / м$	t, c	$M_{кр},$ $H / м$	t, c	$M_{кр},$ $H / м$	t, c	$M_{кр},$ $H / м$	t, c	$M_{кр},$ $H / м$
0	0	1,768	0,031	3,493	0,593	5,096	0,526	6,846	0,274
0,110	0,060	1,798	0,015	3,515	0,574	5,151	0,357	6,868	0,256
0,182	0,131	1,967	0,228	3,537	0,614	5,177	0,377	6,942	0,440
0,209	0,163	1,996	0,214	3,559	0,580	5,221	0,279	6,960	0,417
0,237	0,149	2,025	0,293	3,581	0,614	5,250	0,293	7,147	0,705
0,264	0,235	2,044	0,279	3,617	0,600	5,283	0,204	7,180	0,768
0,291	0,220	2,062	0,338	3,618	0,569	5,313	0,221	7,201	0,748
0,292	0,249	2,091	0,326	3,680	0,525	5,357	0,123	7,202	0,799
0,336	0,235	2,117	0,384	3,702	0,539	5,382	0,142	7,239	0,779
0,358	0,270	2,143	0,368	3,750	0,464	5,441	0,022	7,261	0,859
0,429	0,302	2,176	0,423	3,783	0,477	5,474	0,042	7,287	0,831
0,457	0,282	2,205	0,409	3,812	0,400	5,489	0,015	7,301	0,905
0,484	0,219	2,242	0,484	3,834	0,427	5,511	0	7,327	0,887
0,512	0,236	2,288	0,455	3,911	0,336	5,591	0,073	7,328	0,937
0,539	0,210	2,289	0,496	3,937	0,249	5,632	0,160	7,360	0,919
0,560	0,220	2,330	0,521	3,965	0,271	5,650	0,147	7,389	0,972
0,561	0,185	2,374	0,477	3,966	0,241	5,680	0,209	7,422	1,007
0,589	0,197	2,398	0,497	4,007	0,176	5,760	0,464	7,437	0,987
0,622	0,110	2,399	0,445	4,073	0,101	5,830	0,576	7,470	0,977
0,644	0,131	2,458	0,466	4,095	0,112	5,852	0,557	7,517	1,011
0,677	0,062	2,480	0,455	4,150	0,017	5,922	0,672	7,518	0,968
0,743	0,030	2,506	0,381	4,174	0,029	5,947	0,656	7,558	0,985
0,776	0,016	2,524	0,396	4,175	0,016	5,966	0,725	7,559	0,919
0,798	0	2,561	0,341	4,207	0,023	5,988	0,706	7,595	0,939
0,842	0,030	2,594	0,352	4,208	0	6,021	0,766	7,653	0,832
0,875	0,016	2,631	0,260	4,274	0,063	6,039	0,748	7,679	0,851
0,919	0,094	2,656	0,269	4,293	0,054	6,057	0,792	7,756	0,621
0,947	0,080	2,675	0,189	4,370	0,242	6,083	0,779	7,775	0,638
0,985	0,172	2,711	0,209	4,388	0,230	6,131	0,844	7,811	0,447
1,007	0,158	2,733	0,125	4,487	0,397	6,146	0,824	7,852	0,467
1,040	0,220	2,763	0,147	4,505	0,447	6,170	0,844	7,881	0,383
1,067	0,201	2,810	0,060	4,538	0,432	6,171	0,823	7,914	0,330
1,068	0,250	2,865	0,037	4,557	0,416	6,212	0,855	7,951	0,242
1,101	0,243	2,880	0,048	4,638	0,599	6,245	0,788	7,976	0,256
1,128	0,302	2,920	0,012	4,660	0,582	6,278	0,801	8,039	0,143
1,156	0,293	2,946	0,025	4,685	0,614	6,307	0,731	8,074	0,163
1,192	0,382	2,972	0	4,715	0,646	6,344	0,752	8,075	0,125

Продолжение таблицы Б5

1,214	0,370	3,001	0,075	4,729	0,626	6,362	0,688	8,141	0,075
1,244	0,410	3,023	0,063	4,762	0,675	6,399	0,702	8,222	0,034
1,280	0,381	3,075	0,178	4,788	0,658	6,421	0,592	8,263	0,046
1,317	0,399	3,093	0,162	4,831	0,686	6,454	0,493	8,310	0,011
1,365	0,324	3,210	0,358	4,832	0,722	6,490	0,305	8,362	0,021
1,391	0,342	3,232	0,339	4,861	0,714	6,519	0,320	8,391	0,007
1,424	0,286	3,262	0,410	4,882	0,731	6,520	0,224	8,413	0,017
1,453	0,303	3,284	0,390	4,883	0,697	6,564	0,178	8,446	0,004
1,493	0,252	3,313	0,455	4,920	0,683	6,593	0,110	8,483	0,009
1,556	0,105	3,335	0,435	4,975	0,651	6,619	0,129	8,523	0
1,618	0,068	3,405	0,554	4,993	0,666	6,667	0,028		
1,666	0,024	3,427	0,530	5,026	0,613	6,681	0,012		
1,684	0,039	3,452	0,575	5,049	0,627	6,702	0,029		
1,732	0	3,474	0,555	5,082	0,510	6,703	0		

Таблица Б.6 – Показатели значений суммарных крутящих моментов на метчиках в процессе обработки материала – сталь 45 с помощью циклической подачи и удаления стружки на каждом цикле

t, c	$M_{кр},$ $H / м$	t, c	$M_{кр},$ $H / м$	t, c	$M_{кр},$ $H / м$	t, c	$M_{кр},$ $H / м$	t, c	$M_{кр},$ $H / м$
0	0	1,472	0,225	3,076	0,146	4,964	0,560	6,569	0,138
0,112	0,053	1,491	0,237	3,092	0,131	4,983	0,547	6,588	0,149
0,179	0,131	1,537	0,156	3,260	0,359	5,003	0,561	6,607	0,091
0,199	0,111	1,552	0,094	3,275	0,339	5,029	0,503	6,622	0,107
0,265	0,202	1,571	0,100	3,337	0,416	5,049	0,517	6,680	0,017
0,281	0,188	1,587	0,058	3,360	0,390	5,079	0,433	6,699	0,027
0,300	0,214	1,610	0,066	3,394	0,456	5,144	0,299	6,718	0
0,327	0,195	1,663	0,012	3,417	0,439	5,171	0,313	6,860	0,234
0,342	0,244	1,682	0,022	3,448	0,503	5,209	0,244	6,887	0,220
0,392	0,229	1,709	0,007	3,467	0,478	5,282	0,177	6,940	0,364
0,446	0,244	1,725	0,016	3,528	0,516	5,301	0,190	6,959	0,349
0,465	0,184	1,740	0	3,555	0,493	5,363	0,099	7,170	0,597
0,506	0,198	1,767	0,027	3,578	0,534	5,378	0,116	7,185	0,628
0,507	0,180	1,790	0,011	3,612	0,488	5,447	0,016	7,193	0,644
0,544	0,185	2,004	0,230	3,674	0,443	5,481	0,028	7,212	0,628
0,545	0,162	2,027	0,213	3,701	0,457	5,508	0	7,296	0,763
0,571	0,167	2,050	0,275	3,747	0,390	5,581	0,055	7,316	0,744
0,572	0,147	2,073	0,256	3,777	0,410	5,627	0,135	7,339	0,783
0,598	0,156	2,092	0,309	3,812	0,339	5,642	0,112	7,361	0,760
0,599	0,109	2,115	0,292	3,842	0,359	5,665	0,167	7,362	0,799

Продолжение таблицы Б6

0,614	0,089	2,138	0,332	3,904	0,290	5,680	0,154	7,396	0,785
0,644	0,101	2,161	0,309	3,938	0,208	5,765	0,364	7,398	0,835
0,645	0,058	2,184	0,365	3,969	0,226	5,837	0,485	7,427	0,856
0,668	0,066	2,207	0,348	4,007	0,152	5,860	0,467	7,453	0,833
0,702	0,044	2,245	0,413	4,034	0,162	5,937	0,576	7,473	0,847
0,737	0,024	2,284	0,385	4,068	0,083	5,956	0,553	7,492	0,822
0,767	0,012	2,322	0,441	4,095	0,095	5,979	0,620	7,518	0,856
0,794	0,001	2,353	0,408	4,149	0,013	5,998	0,586	7,542	0,824
0,825	0	2,383	0,422	4,168	0,024	6,025	0,649	7,561	0,837
0,848	0,022	2,399	0,375	4,198	0,001	6,052	0,631	7,584	0,778
0,871	0,014	2,444	0,397	4,221	0,016	6,067	0,675	7,599	0,796
0,936	0,083	2,467	0,382	4,233	0	6,086	0,651	7,653	0,702
0,937	0,068	2,490	0,323	4,294	0,073	6,125	0,712	7,676	0,718
0,989	0,122	2,521	0,332	4,309	0,063	6,150	0,696	7,725	0,597
1,012	0,168	2,536	0,297	4,386	0,211	6,151	0,718	7,741	0,619
1,031	0,152	2,559	0,287	4,405	0,194	6,171	0,710	7,825	0,381
1,051	0,183	2,586	0,296	4,505	0,384	6,172	0,695	7,840	0,397
1,074	0,168	2,605	0,229	4,528	0,374	6,196	0,695	7,901	0,297
1,089	0,204	2,632	0,241	4,551	0,351	6,197	0,708	7,947	0,237
1,108	0,188	2,651	0,177	4,643	0,506	6,223	0,718	7,974	0,205
1,123	0,231	2,674	0,159	4,666	0,484	6,224	0,687	7,993	0,220
1,139	0,214	2,697	0,174	4,685	0,517	6,251	0,666	8,051	0,115
1,158	0,266	2,732	0,107	4,714	0,501	6,270	0,684	8,074	0,132
1,173	0,251	2,762	0,119	4,715	0,556	6,316	0,618	8,097	0,109
1,181	0,268	2,789	0,064	4,738	0,530	6,339	0,634	8,150	0,062
1,188	0,283	2,847	0,029	4,773	0,582	6,358	0,598	8,235	0,023
1,211	0,328	2,866	0,040	4,788	0,557	6,377	0,609	8,273	0,039
1,250	0,347	2,889	0,022	4,811	0,582	6,396	0,555	8,346	0,010
1,273	0,323	2,904	0,034	4,826	0,576	6,431	0,568	8,380	0,018
1,322	0,339	2,931	0,002	4,849	0,617	6,432	0,464	8,407	0,004
1,368	0,276	2,950	0,019	4,865	0,605	6,454	0,474	8,434	0,014
1,391	0,288	2,965	0	4,884	0,627	6,477	0,280	8,464	0,002
1,411	0,245	3,011	0,065	4,911	0,599	6,504	0,292	8,487	0,010
1,449	0,257	3,046	0,119	4,949	0,613	6,531	0,192	8,518	0

Таблица Б.7 – Показатели значений суммарных крутящих моментов на метчиках в процессе обработки материала – нержавеющей сталь 34ХН3М с помощью равномерной подачи

t, c	$M_{кр},$ $H / м$	t, c	$M_{кр},$ $H / м$	t, c	$M_{кр},$ $H / м$	t, c	$M_{кр},$ $H / м$	t, c	$M_{кр},$ $H / м$
0	0	0,383	0,877	0,727	1,208	1,077	0,674	1,534	0,073
0,038	0,126	0,393	0,864	0,731	1,213	1,086	0,684	1,549	0,091
0,079	0,208	0,394	0,912	0,737	1,222	1,098	0,647	1,551	0,049
0,087	0,197	0,404	0,898	0,746	1,205	1,113	0,642	1,568	0,066
0,096	0,322	0,417	0,982	0,758	1,237	1,124	0,670	1,577	0,032
0,110	0,302	0,427	0,958	0,769	1,222	1,135	0,657	1,589	0,057
0,111	0,386	0,434	0,982	0,792	1,262	1,152	0,684	1,606	0,073
0,121	0,408	0,442	0,970	0,792	1,201	1,153	0,664	1,621	0,038
0,129	0,387	0,457	0,982	0,818	1,222	1,169	0,675	1,630	0,056
0,130	0,435	0,467	0,969	0,819	1,140	1,181	0,656	1,642	0,032
0,164	0,492	0,487	0,991	0,833	1,162	1,192	0,670	1,651	0,070
0,165	0,463	0,489	0,954	0,850	1,170	1,209	0,638	1,661	0,046
0,191	0,405	0,504	0,979	0,852	1,105	1,222	0,594	1,674	0,055
0,206	0,428	0,514	0,962	0,864	1,121	1,232	0,614	1,693	0,027
0,207	0,481	0,527	1,005	0,865	1,075	1,247	0,538	1,706	0,048
0,221	0,453	0,538	0,973	0,888	1,095	1,261	0,558	1,719	0,056
0,239	0,524	0,549	1,082	0,899	0,972	1,262	0,438	1,721	0,032
0,240	0,582	0,550	1,095	0,909	0,997	1,279	0,344	1,732	0,008
0,249	0,569	0,561	1,079	0,916	0,982	1,296	0,333	1,744	0,024
0,257	0,635	0,562	1,126	0,928	1,000	1,309	0,359	1,755	0,041
0,266	0,617	0,574	1,126	0,956	0,940	1,330	0,287	1,766	0,015
0,274	0,675	0,595	1,145	0,957	0,900	1,343	0,305	1,767	0,041
0,289	0,633	0,596	1,095	0,973	0,917	1,354	0,239	1,783	0,028
0,300	0,610	0,608	1,114	0,982	0,872	1,368	0,257	1,795	0,035
0,301	0,706	0,618	1,102	0,992	0,888	1,379	0,206	1,796	0,007
0,314	0,680	0,631	1,207	1,003	0,874	1,394	0,225	1,814	0,018
0,315	0,740	0,640	1,186	1,013	0,902	1,407	0,126	1,823	0,005
0,317	0,794	0,648	1,216	1,022	0,881	1,428	0,141	1,840	0,015
0,331	0,782	0,671	1,237	1,039	0,892	1,445	0,168	1,859	0,002
0,340	0,832	0,680	1,223	1,040	0,784	1,457	0,133	1,874	0,008
0,349	0,819	0,698	1,237	1,051	0,801	1,472	0,154	1,891	0
0,359	0,889	0,699	1,207	1,052	0,721	1,500	0,096		
0,370	0,870	0,716	1,225	1,065	0,738	1,513	0,117		

Таблица Б.8 – Показатели значений суммарных крутящих моментов на метчиках в процессе обработки материала – нержавеющей сталь 34ХН3М с помощью прерывистой подачи

t, c	$M_{кр},$ $H / м$	t, c	$M_{кр},$ $H / м$	t, c	$M_{кр},$ $H / м$	t, c	$M_{кр},$ $H / м$	t, c	$M_{кр},$ $H / м$
0	0	1,456	0,332	3,293	0,366	5,015	0,753	7,268	0,753
0,073	0,081	1,479	0,279	3,320	0,443	5,038	0,707	7,291	0,837
0,101	0,063	1,507	0,297	3,339	0,423	5,074	0,651	7,323	0,824
0,119	0,107	1,508	0,189	3,366	0,501	5,097	0,672	7,324	0,869
0,142	0,089	1,539	0,209	3,394	0,477	5,120	0,617	7,360	0,849
0,160	0,137	1,585	0,117	3,439	0,566	5,166	0,551	7,362	0,941
0,179	0,119	1,607	0,129	3,458	0,557	5,267	0,378	7,418	0,908
0,206	0,177	1,640	0,066	3,513	0,627	5,294	0,315	7,419	0,981
0,224	0,162	1,695	0,013	3,514	0,602	5,363	0,228	7,447	0,965
0,243	0,221	1,722	0,020	3,549	0,638	5,386	0,248	7,479	1,022
0,261	0,201	1,749	0	3,581	0,618	5,445	0,131	7,506	0,999
0,262	0,258	1,795	0,036	3,582	0,669	5,477	0,149	7,529	1,071
0,293	0,245	1,818	0,020	3,609	0,690	5,541	0,021	7,566	1,100
0,311	0,291	2,033	0,314	3,632	0,660	5,564	0,041	7,584	1,078
0,334	0,273	2,061	0,293	3,659	0,677	5,592	0	7,607	1,056
0,336	0,312	2,079	0,354	3,660	0,618	5,674	0,071	7,639	1,091
0,362	0,300	2,111	0,342	3,765	0,561	5,720	0,171	7,667	1,059
0,394	0,332	2,130	0,396	3,810	0,504	5,752	0,150	7,694	1,074
0,421	0,300	2,157	0,374	3,842	0,522	5,926	0,626	7,694	0,996
0,440	0,318	2,159	0,426	3,884	0,440	5,958	0,605	7,740	1,020
0,463	0,276	2,198	0,422	3,916	0,464	6,036	0,738	7,763	0,953
0,464	0,233	2,221	0,459	3,952	0,389	6,059	0,710	7,764	0,902
0,508	0,257	2,253	0,450	3,980	0,335	6,077	0,789	7,799	0,923
0,527	0,227	2,254	0,498	3,982	0,272	6,105	0,758	7,841	0,776
0,550	0,239	2,276	0,533	4,030	0,290	6,107	0,834	7,877	0,797
0,568	0,206	2,317	0,498	4,058	0,242	6,137	0,810	7,951	0,485
0,600	0,210	2,318	0,541	4,085	0,185	6,160	0,861	7,982	0,506
0,632	0,119	2,359	0,566	4,145	0,111	6,192	0,848	8,033	0,369
0,650	0,137	2,391	0,521	4,163	0,123	6,242	0,918	8,083	0,294
0,696	0,063	2,418	0,541	4,206	0,035	6,270	0,900	8,084	0,249
0,742	0,042	2,441	0,480	4,210	0,017	6,288	0,933	8,124	0,272
0,774	0,018	2,487	0,500	4,245	0,029	6,311	0,914	8,152	0,207
0,811	0	2,519	0,483	4,264	0,011	6,343	0,864	8,179	0,149
0,889	0,036	2,520	0,410	4,300	0	6,370	0,885	8,212	0,171
0,925	0,129	2,546	0,431	4,369	0,093	6,412	0,794	8,262	0,083
0,943	0,116	2,606	0,360	4,387	0,080	6,439	0,816	8,367	0,030
0,985	0,180	2,642	0,384	4,456	0,267	6,457	0,767	8,422	0,048

1,003	0,166	2,644	0,291	4,479	0,258	6,480	0,707	8,472	0,011
1,053	0,264	2,716	0,206	4,575	0,435	6,503	0,732	8,473	0,050
1,085	0,243	2,752	0,230	4,598	0,474	6,535	0,578	8,505	0,035
1,127	0,353	2,775	0,140	4,626	0,461	6,590	0,353	8,536	0,042
1,154	0,339	2,817	0,162	4,726	0,657	6,618	0,372	8,537	0,018
1,156	0,378	2,818	0,080	4,728	0,623	6,641	0,240	8,538	0,009
1,186	0,359	2,908	0,038	4,800	0,705	6,718	0,117	8,569	0,024
1,209	0,407	2,940	0,047	4,823	0,677	6,737	0,134	8,596	0,004
1,268	0,450	2,963	0,017	4,855	0,738	6,792	0,015	8,619	0,018
1,269	0,413	2,986	0,027	4,882	0,717	6,810	0,038	8,669	0,003
1,310	0,429	3,013	0	4,918	0,746	6,838	0	8,697	0,011
1,374	0,351	3,096	0,156	4,919	0,789	6,970	0,308	8,729	0
1,401	0,369	3,114	0,143	4,978	0,764	7,002	0,287		
1,429	0,312	3,256	0,381	4,979	0,740	7,039	0,452		

Таблица Б.9 – Показатели значений суммарных крутящих моментов на метчиках в процессе обработки материала – нержавеющей стали 34ХН3М с помощью циклической подачи и удаления стружки на каждом цикле

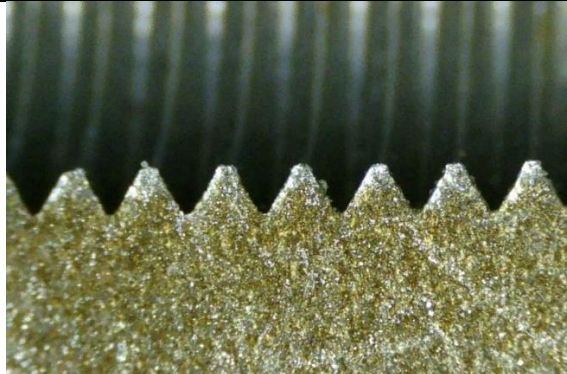
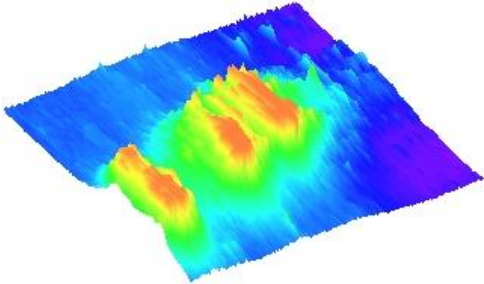
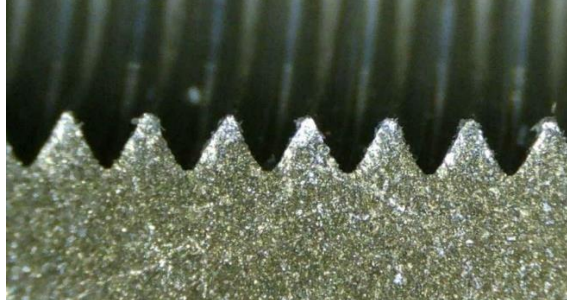
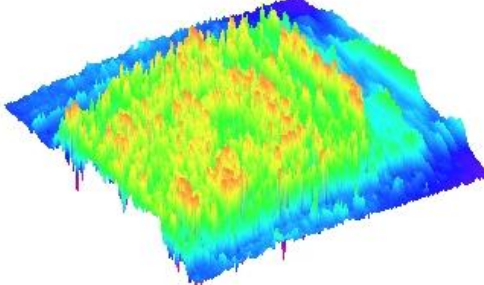
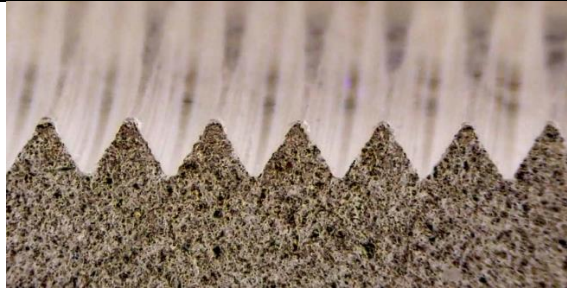
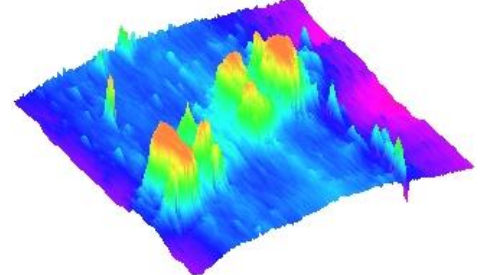
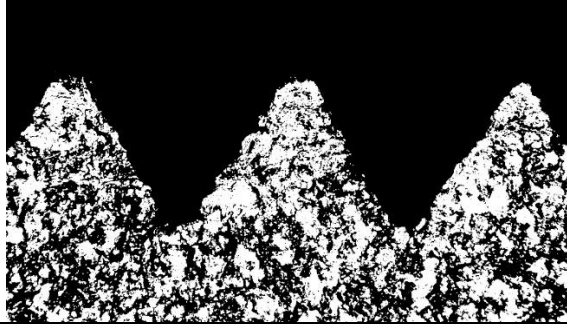
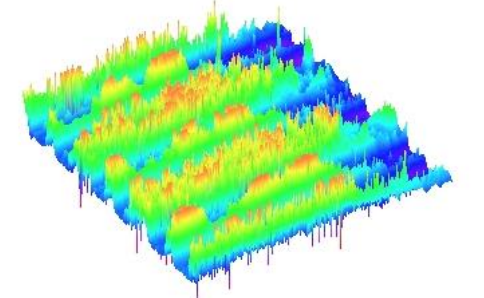
t, c	$M_{кр},$ $H / м$	t, c	$M_{кр},$ $H / м$	t, c	$M_{кр},$ $H / м$	t, c	$M_{кр},$ $H / м$	t, c	$M_{кр},$ $H / м$
0	0	1,273	0,385	3,005	0,024	5,176	0,481	7,328	0,686
0,082	0,072	1,301	0,353	3,037	0,009	5,244	0,338	7,356	0,748
0,105	0,057	1,319	0,370	3,101	0,136	5,272	0,359	7,383	0,729
0,133	0,089	1,388	0,306	3,119	0,113	5,313	0,272	7,406	0,812
0,151	0,075	1,411	0,318	3,275	0,326	5,341	0,288	7,443	0,780
0,169	0,115	1,443	0,261	3,302	0,311	5,386	0,193	7,444	0,843
0,188	0,098	1,489	0,240	3,389	0,424	5,405	0,213	7,475	0,818
0,214	0,142	1,507	0,158	3,408	0,401	5,469	0,112	7,476	0,855
0,220	0,152	1,539	0,175	3,527	0,534	5,487	0,131	7,507	0,845
0,238	0,134	1,576	0,103	3,545	0,511	5,551	0,018	7,508	0,884
0,256	0,196	1,617	0,084	3,568	0,552	5,579	0,032	7,535	0,869
0,275	0,183	1,644	0,060	3,591	0,523	5,611	0	7,557	0,949
0,276	0,219	1,699	0,012	3,592	0,578	5,657	0,053	7,576	0,926
0,298	0,207	1,727	0,021	3,618	0,561	5,684	0,041	7,599	0,928
0,321	0,247	1,759	0	3,619	0,588	5,735	0,148	7,617	0,908
0,347	0,232	1,795	0,027	3,692	0,527	5,762	0,133	7,654	0,943
0,348	0,267	1,814	0,014	3,779	0,486	5,863	0,403	7,686	0,908
0,385	0,256	2,006	0,204	3,825	0,434	5,936	0,540	7,702	0,923
0,417	0,278	2,029	0,192	3,847	0,457	5,968	0,516	7,704	0,860
0,418	0,261	2,075	0,273	3,889	0,371	6,046	0,637	7,750	0,872

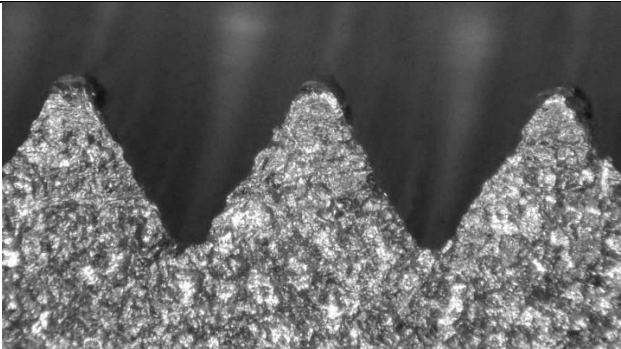
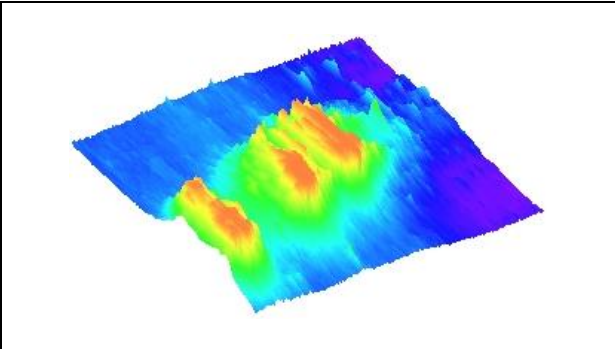
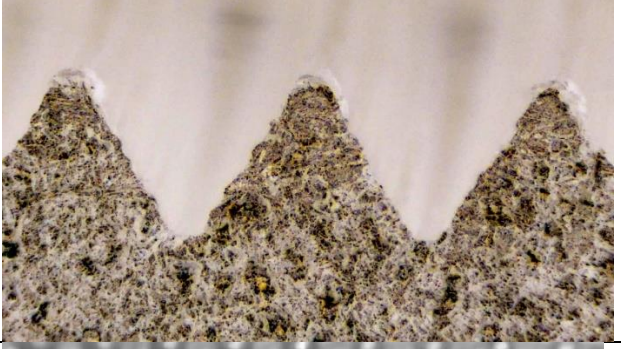
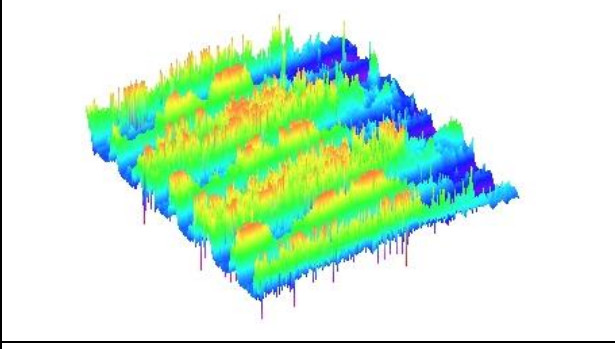
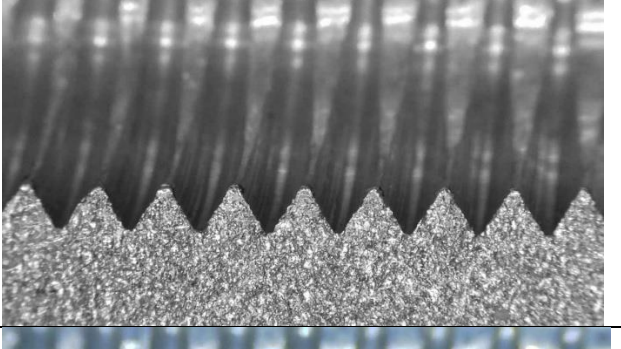
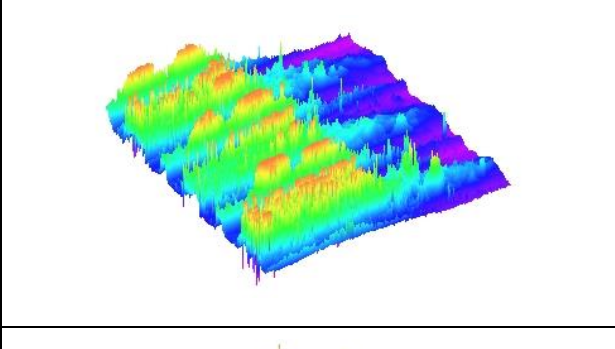
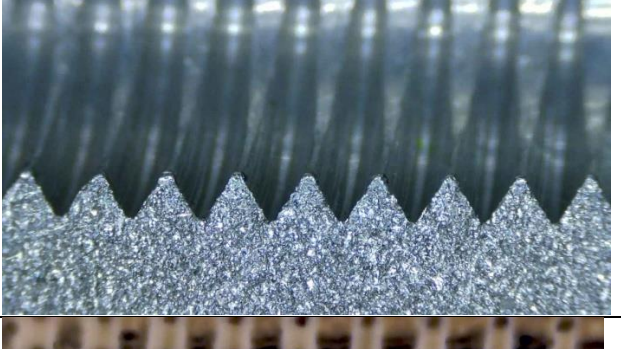
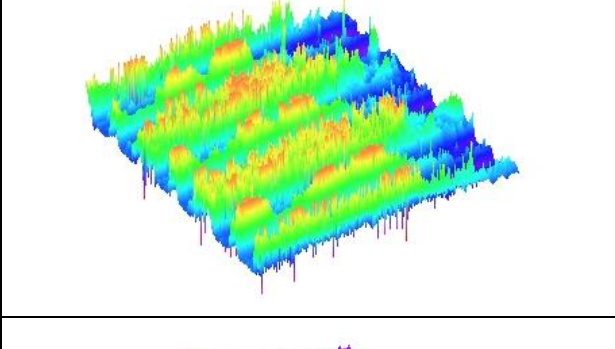
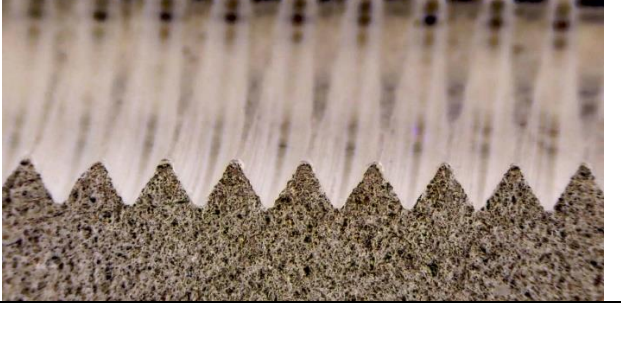
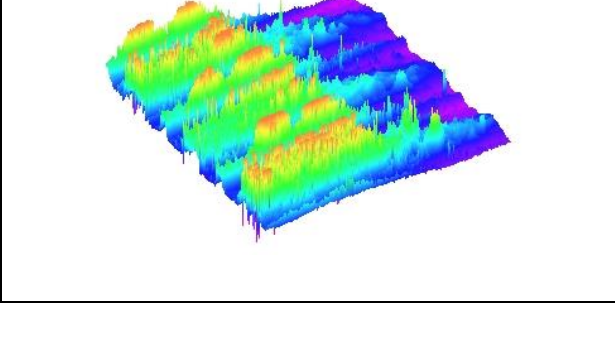
Продолжение таблицы Б9

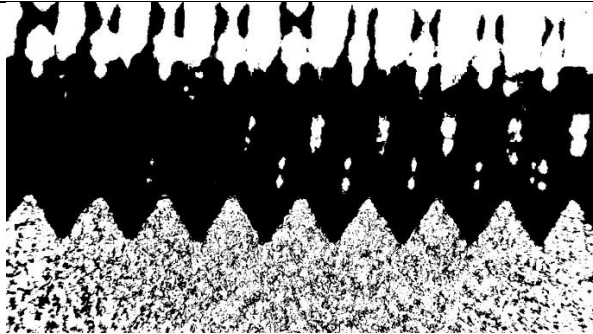
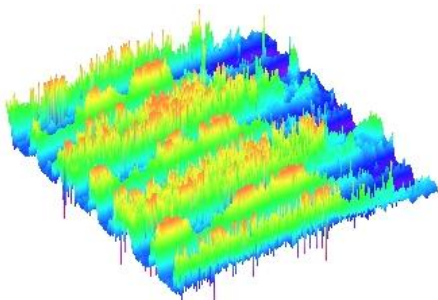
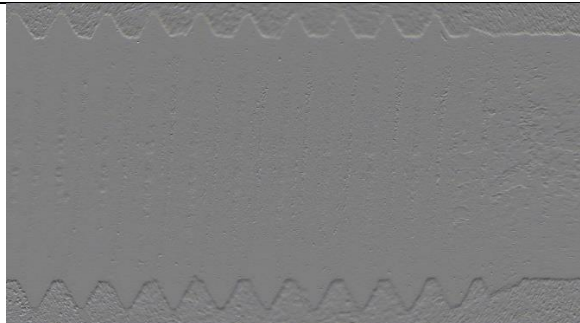
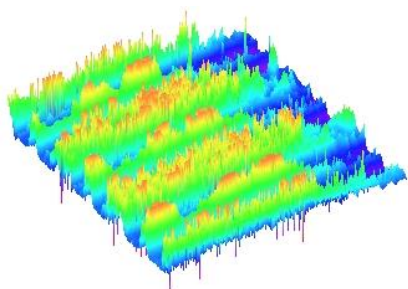
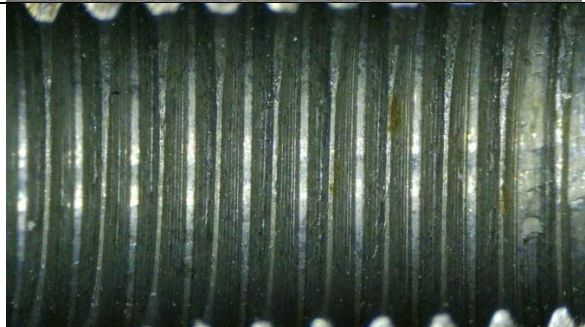
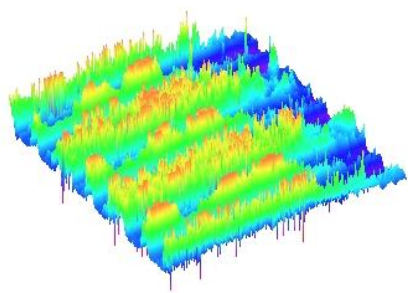
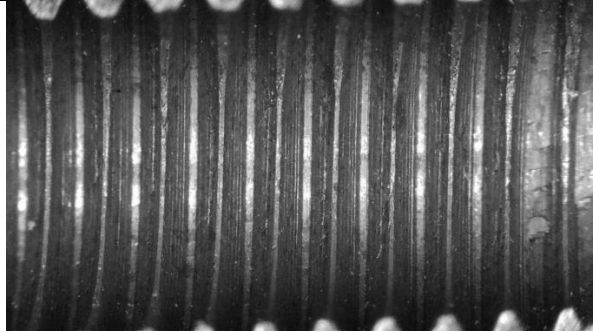
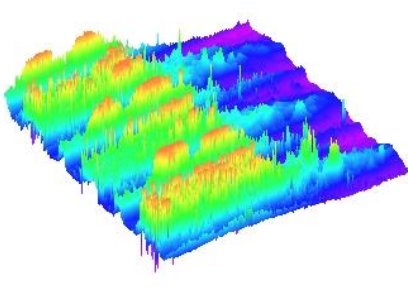
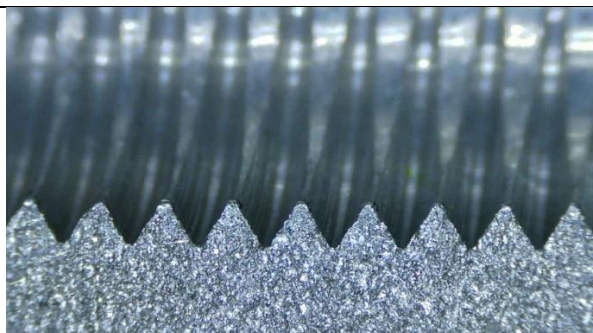
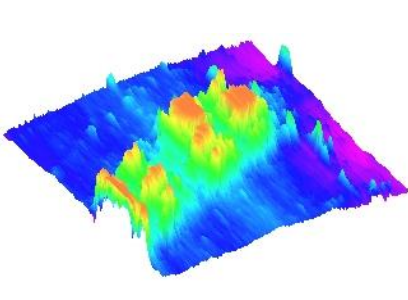
0,457	0,270	2,093	0,261	3,925	0,394	6,073	0,605	7,786	0,774
0,458	0,235	2,116	0,306	3,948	0,341	6,074	0,676	7,814	0,790
0,495	0,201	2,134	0,288	4,003	0,285	6,115	0,649	7,855	0,664
0,518	0,219	2,180	0,358	4,026	0,229	6,133	0,712	7,883	0,682
0,519	0,190	2,212	0,342	4,054	0,247	6,160	0,689	7,906	0,533
0,550	0,205	2,244	0,425	4,081	0,166	6,162	0,738	7,938	0,549
0,573	0,176	2,267	0,403	4,154	0,100	6,202	0,723	7,939	0,530
0,600	0,184	2,299	0,458	4,173	0,110	6,284	0,792	7,974	0,536
0,602	0,161	2,341	0,422	4,223	0,018	6,307	0,771	7,976	0,418
0,637	0,101	2,342	0,465	4,266	0,033	6,335	0,792	8,002	0,437
0,655	0,121	2,377	0,486	4,270	0,011	6,357	0,736	8,029	0,339
0,687	0,057	2,405	0,445	4,305	0	6,389	0,753	8,098	0,223
0,724	0,041	2,428	0,466	4,379	0,075	6,417	0,683	8,125	0,241
0,747	0,051	2,446	0,409	4,388	0,084	6,449	0,701	8,199	0,133
0,765	0,024	2,501	0,436	4,415	0,066	6,451	0,655	8,226	0,152
0,797	0,014	2,524	0,416	4,466	0,235	6,481	0,679	8,277	0,081
0,820	0	2,551	0,358	4,489	0,223	6,504	0,611	8,386	0,027
0,893	0,030	2,579	0,368	4,567	0,376	6,531	0,635	8,428	0,044
0,939	0,115	2,606	0,317	4,612	0,407	6,559	0,495	8,478	0,011
0,957	0,100	2,629	0,317	4,631	0,392	6,596	0,302	8,501	0,042
0,985	0,155	2,657	0,326	4,736	0,557	6,641	0,318	8,519	0,029
1,012	0,139	2,658	0,252	4,773	0,528	6,669	0,195	8,547	0,039
1,067	0,220	2,689	0,259	4,855	0,629	6,728	0,098	8,548	0,012
1,086	0,205	2,721	0,181	4,873	0,615	6,751	0,115	8,570	0,021
1,113	0,278	2,744	0,172	4,905	0,644	6,797	0,014	8,606	0,006
1,131	0,261	2,771	0,192	4,928	0,676	6,834	0,030	8,629	0,014
1,154	0,305	2,794	0,113	4,965	0,655	6,836	0	8,661	0,003
1,173	0,287	2,831	0,134	5,025	0,629	6,985	0,263	8,684	0,011
1,191	0,332	2,849	0,063	5,043	0,647	7,017	0,243	8,730	0
1,218	0,309	2,899	0,032	5,066	0,603	7,072	0,396		
1,219	0,353	2,941	0,041	5,098	0,552	7,099	0,376		
1,246	0,342	2,982	0	5,121	0,578	7,306	0,712		

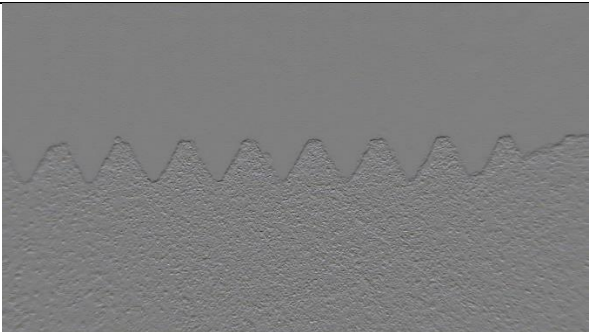
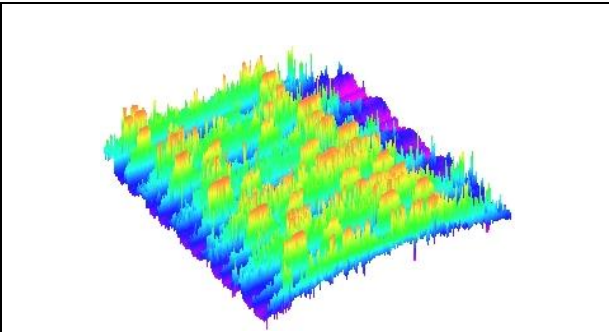
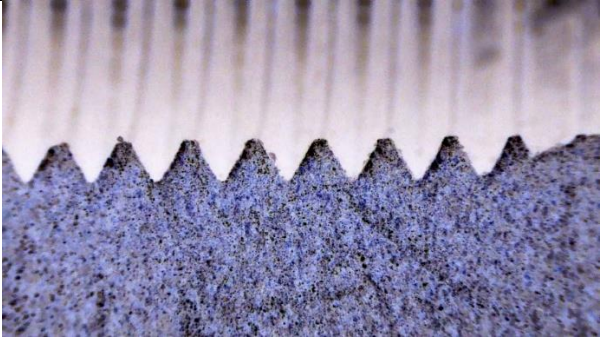
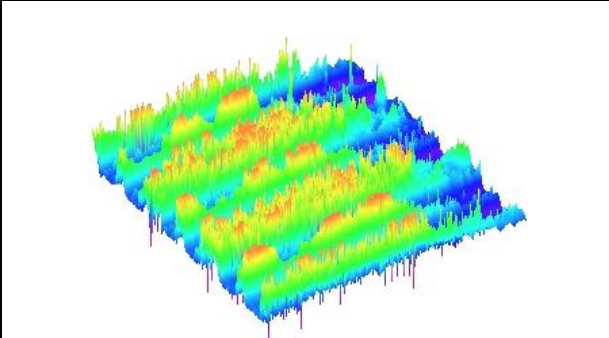
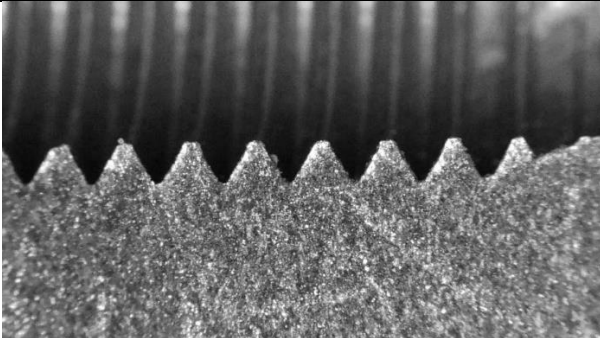
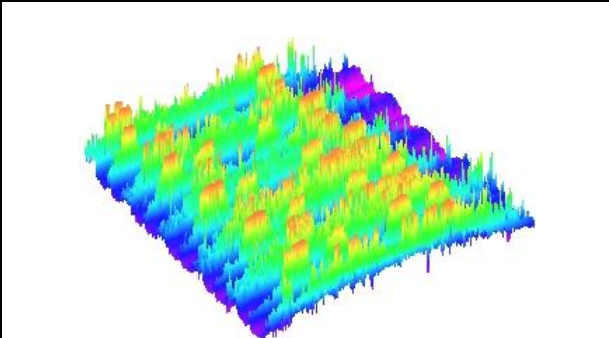
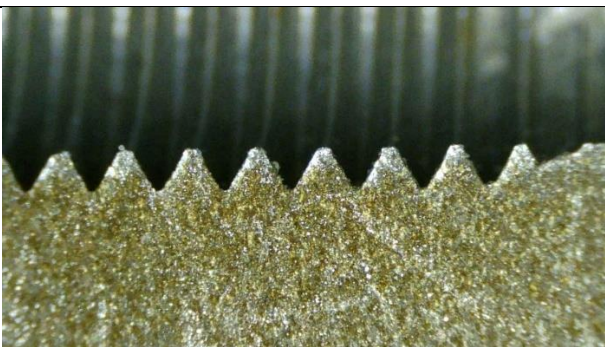
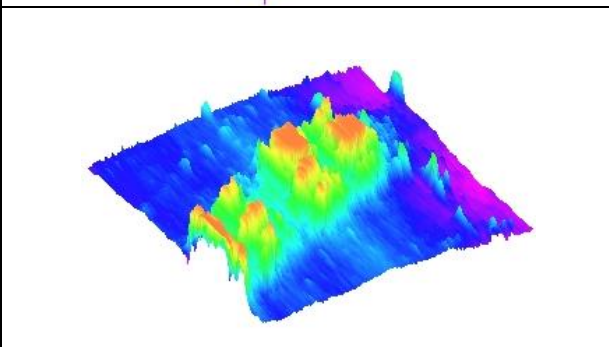
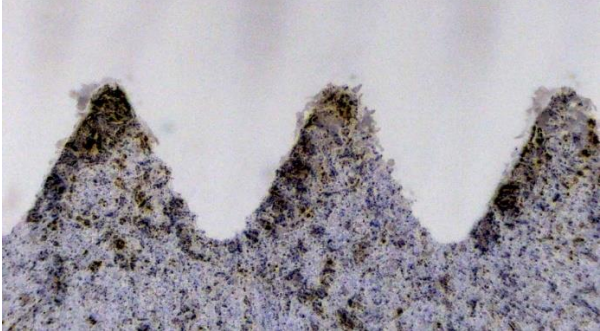
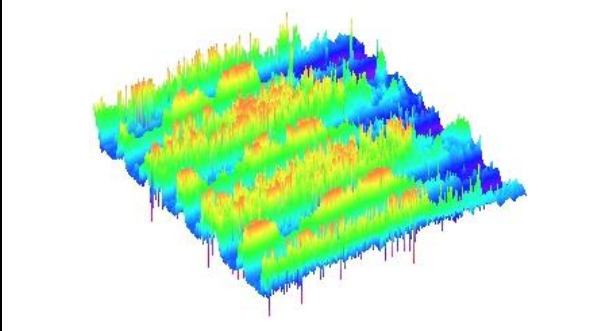
ПРИЛОЖЕНИЕ В

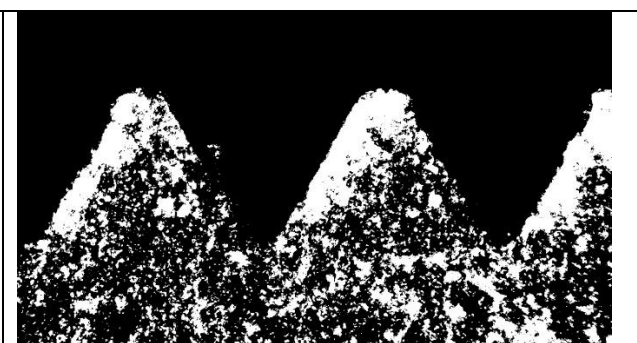
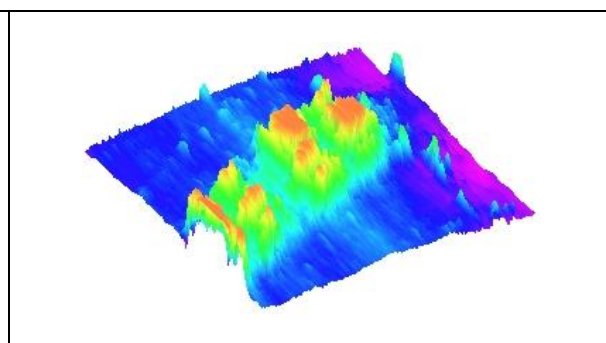
Таблица В1 – Микроструктура резьбы, наблюдаемая через цифровой микроскоп МЕГЕОН 33102 (в масштабе 100:1, 150:1 и 200:1) и 3D-изображения поверхности структуры путем сканирующей электронной микроскопии (TESKAN MIRA 3) на экспериментальных образцах в разрезе, обработанных режущими, деформирующими и режуще-деформирующими метчиками в материалах АЛ 4, сталь 45 и нержавеющая сталь 34ХН3М

Образец	Микроструктура резьбы, наблюдаемая через цифровой микроскоп МЕГЕОН 33102	3D-изображения структуры путем сканирующей электронной микроскопии (TESKAN MIRA 3)
1		
2		
3		
4		

5		
6		
7		
8		
9		

10		
11		
12		
13		
14		

15		
16		
17		
18		
19		

20		
----	---	--

ПРИЛОЖЕНИЕ Г



ЛОКОМОТИВ СЕРВИС
РОСТОВ

346330, Россия, Ростовская область,
г. Донецк, проспект Ленина, 37а
т/ф (86368) 23732

E-mail: locomotiv_rostov@mail.ru

ОГРН 1146191001263

ИНН/КПП 6145016260/614501001

«УТВЕРЖДАЮ»

Проректор по научной деятельности
ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет»

М.П. Евстигнеев



11 2024г.

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ООО «Локомотив
Сервис Ростов»

О.П. Першкова



11 2024г.

А К Т

внедрения результатов диссертационной работы

Мирзоян Наталии Юрьевны

«Повышение эффективности мелкоразмерного резбообразования в глухих
глубоких отверстиях путем оптимизации цикла обработки»

Комиссия в составе:

Председатель:

Главный технолог ООО «Локомотив-Сервис Ростов» – Шинкаренко А.С.

Члены комиссии:

Начальник технического бюро ООО «Локомотив-Сервис Ростов» –
Кушнаренко О.А.;

Директор Дирекции научной деятельности
ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет» – Чуклин А.А.;

Доцент кафедры «Технология машиностроения» – Рощупкин С.И.

Комиссия установила:

1. Проведено внедрение в производство результатов исследований и практических рекомендаций, обеспечивающих повышение эффективности мелкоразмерного резбообразования в глухих глубоких отверстиях путем оптимизации цикла обработки.

2. Проверена и внедрена методика определения режимных параметров резьбообработки в глухих глубоких отверстиях в заготовках из легированных сталей и алюминиевых сплавов, позволяющая обеспечить надежность резьбовых соединений.
3. Представленные результаты и проведенные экспериментальные исследования позволили обеспечить заданное качество резьбы в глухих отверстиях, увеличить стойкость режущего инструмента в 2- 2,5 раза по сравнению с известными методами нарезания резьбы в глухих глубоких отверстиях.

Выводы комиссии:

1. Разработанный на основе морфологического анализа и параметрического синтеза способ резьбообразования в глухих глубоких отверстиях на основе программного управления с циклической подачей и удалением стружки на каждом цикле режущим деформирующим метчиком позволяет повысить показатели качества получаемых резьбовых поверхностей, исключить заклинивание и поломку мелкоразмерного метчика путем снижения величины максимального крутящего момента в 1,3 раза по сравнению с традиционным способом и равномерной подачей, повысить стойкость инструмента, а также, как следствие – технологическую и эксплуатационную надежность всей системы обработки.
2. Предполагаемый годовой экономический эффект от внедрения результатов исследований составил 1760000 рублей

ФГАОУ ВО «Севастопольский
государственный университет»

 Чуклин А.А.

Доцент кафедры «Технология
машиностроения»

 Рошупкин С.И.

Главный технолог ООО «Локомотив-
Сервис Ростов

 Шинкаренко А.С.

Начальник технического бюро
ООО «Локомотив-Сервис Ростов»

 Кушнаренко О.А.