

На правах рукописи



Мирзоян Наталия Юрьевна

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

Специальность 2.5.6 – Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Севастополь – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Севастопольский государственный университет» (ФГАОУ ВО «СевГУ») на кафедре «Автоматизация и технология машиностроения».

Научный руководитель:

Харченко Александр Олегович,
кандидат технических наук, профессор

Официальные оппоненты:

Хандожко Александр Владимирович,
доктор технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «Брянский государственный
технический университет», профессор
кафедры «Металлорежущие станки и
инструменты»

Умеров Эрвин Джеватович, кандидат
технических наук, доцент, ГБОУ ВО РК
«Крымский инженерно-педагогический
университет имени Февзи Якубова»,
начальник научно-производственного
центра инжиниринговых технологий
(г. Симферополь)

Ведущая организация:

ФГБОУ ВО «Алтайский государственный
технический университет им.
И.И. Ползунова» (г. Барнаул)

Защита состоится 25 сентября 2026 г. в 15⁰⁰ на заседании диссертационного совета 24.2.393.01 при ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» по адресу: 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 31, Конференц-зал, ауд.1.8.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» и на сайте – www.sevsu.ru

Автореферат разослан «__» июня 2026 г.

Отзывы на автореферат (в 2-х экземплярах, заверенные печатью организации) просьба высылать по адресу: 299053, г. Севастополь, ул. Университетская, 33, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.393.01 Покинтелице Николаю Ивановичу.

E-mail: nipokintelitsa@mail.sevsu.ru

Тел.: 8 (8692) 41-77-41 (доб. 1150)

Ученый секретарь

диссертационного совета,

д-р техн. наук, профессор

Н.И. Покинтелица

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 резьбообразования в глухих глубоких отверстиях путём оптимизации цикла обработки, чем и обуславливается актуальность данной темы исследования.

Степень разработанности темы исследования. Исследованию закономерностей процесса формирования внутренних резьбовых 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 резьб, фундаментальных положений для обеспечения их точности и качества. Однако, несмотря на существенную теоретическую и практическую базу, до сих пор не решены задачи высокоэффективной резьбообработки мелкоразмерных глухих глубоких отверстий.

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

Основные задачи исследования:

1. Исследовать причины снижения эффективности и точности формообразования внутренних резьб малых диаметров в деталях с глухими глубокими отверстиями.
2. Разработать общую модель формирования технологической системы резьбообработки, алгоритм обеспечения точности и структурную схему процесса мелкоразмерного резьбообразования в глухих глубоких отверстиях.
3. Разработать математические модели для оценки надёжности технологической системы мелкоразмерного резьбообразования в глухих глубоких отверстиях с учетом потоков отказов и восстановлений.
4. Усовершенствовать на основе морфологического анализа и структурно-компоновочного синтеза процесс формообразования рабочей поверхности мелкоразмерных резьб в глухих глубоких отверстиях.

5. Экспериментально подтвердить эффективность усовершенствованного процесса формообразования мелкоразмерных 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 мелкоразмерного 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 надежности технологической системы (станка, инструмента и приспособления) мелкоразмерного 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 надежности технологической системы мелкоразмерного 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 мелкоразмерном 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 на основе нового способа получения резбы, повышающего стойкость метчика, а также точность и качество обработанной резбовой поверхности в глухих глубоких отверстиях.

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

Предметом исследования являются закономерности формирования показателей эффективности – стойкости инструмента, точности и качества обработанной резбовой 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, теории 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 мелкоразмерного резбообразования в глухих глубоких отверстиях.

Положения, выносимые на защиту:

1. Закономерности влияния параметров процесса мелкоразмерного резбообразования 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 мелкоразмерных 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 мелкоразмерного резбообразования 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. Получено решение о выдаче патента на изобретение «Способ изготовления резб в глухих отверстиях».

Структура и объем 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.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении отражена актуальность темы и обоснована необходимость повышения эффективности мелкоразмерного резбообразования в глухих глубоких отверстиях, определены цель и научные задачи работы; перечислены основные результаты с оценкой их научной новизны, теоретического и практического значения; указаны методология и методы исследования, описана структура работы.

Первая глава посвящена анализу состояния исследований по теме для достижения цели диссертационной работы – повышения эффективности мелкоразмерного

резьбообразования в глухих глубоких отверстиях (МРвГГО) путём оптимизации цикла обработки. Анализ показал, что резьбы в деталях формируются на финальной стадии технологического процесса, брак на этой операции приводит к браку самой детали, при этом вопросы обеспечения показателей эффективности и качества мелкогабаритного резьбообразования в глухих глубоких отверстиях недостаточно изучены и требуют дальнейшего детального исследования.

Во второй главе диссертации рассматривается анализ и моделирование МРвГГО. Для решения задач диссертационного исследования процесс МРвГГО рассматривается с помощью общей модели формирования технологической системы резьбообработки.

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 этап – к оценке достигнутого состояния и дальнейший переход на третий этап для сопоставления с целью научного исследования. Повышение эффективности и точности МРвГГО может быть достигнуто за счёт выполнения этапов разработанного алгоритма. Структурная схема процесса МРвГГО включает в себя отдельные подсистемы и элементы, взаимодействующие между собой – инструмент X_u , заготовка X_z , приспособление X_n , станок X_c , управляющие воздействия $X_y(\tau)$ и внешняя среда $X_{cp}(\tau)$, что можно представить с помощью выражения (1):

$$Z_{\alpha}(\tau) = Z_c(\tau) + Z_y(\tau) + Z_n(\tau) + Z_z(\tau) + Z_{cp}(\tau) + Z_u(\tau), \quad (1)$$

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

Обоснование с помощью морфологического анализа структуры технологической системы МРвГГО на основе учета суммарных качественных показателей (K_c, K_n, K_u) для каждой из подсистем $K = 1 - \sum_{i=1}^n \frac{1-K_i}{n}$, где n – множество признаков подсистемы, K_i – качественный показатель по каждому признаку соответствующей подсистемы ($K_i = 0,5 \dots 1,0$), позволило выявить три рациональных варианта:

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

Структуры инструмента 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) (рисунок 1).

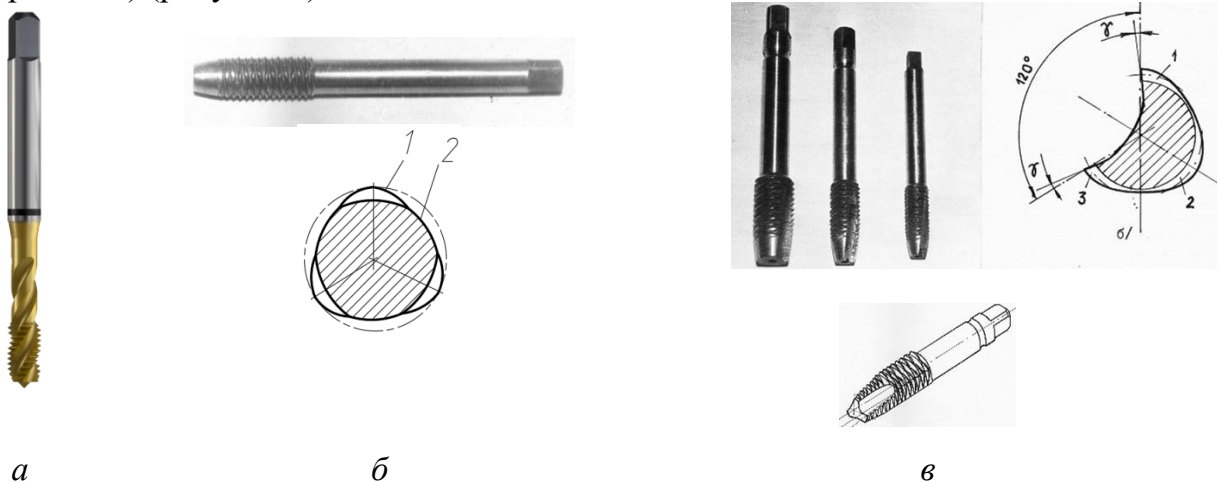


Рисунок 1 – Рациональные структурные варианты I_1 (а), I_2 (б), I_3 (в) подсистемы «инструмент» (Z) по результатам морфологического анализа

Для оценки надёжности вариантов выбранных технологических систем для

получения МРвГГО необходимо рассмотреть особенности возникновения отказов функционирования (эксплуатационную надежность) и параметрических отказов (технологическую надёжность) системы в реальных условиях функционирования. 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 МРвГГО, целесообразно использование многооперационного обрабатывающего центра мод. MAXXmill 630. Для определения его надежности построим размеченный граф его состояний (рисунок 2), где S_i – состояния с учетом параметрических отказов и отказов функционирования отдельных узлов станка (инструмента, приспособления, привода перемещения по осям x, y, z , привода оси z , СЧПУ, электрического оборудования, поворотного узла станка, привода вращения шпинделя), λ_{ij} , μ_{ij} – соответственно потоки отказов и восстановлений.

Уравнения для финальных вероятностей P_i состояний S_i можно представить в виде системы А.Н. Колмогорова. Решение системы уравнений с помощью условия нормировки $P_1 + P_2 + \dots + P_{17} = 1$ позволяет получить выражения для $P_1, \dots, P_{17}$. На основании проведенных исследований аналогичных объектов и принятых значений интенсивностей получим расчетные значения указанных вероятностей.

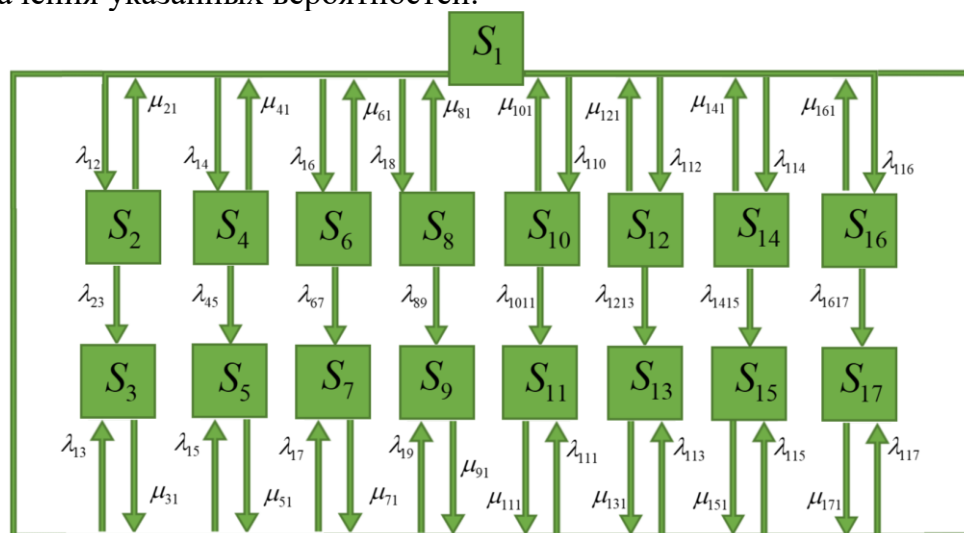


Рисунок 2 – Граф состояний станка с учетом отказов и восстановлений его подсистем

Из расчетных значений следует, что наибольшее влияние на надежность технологической системы станка оказывают инструмент ($P_2 = 0,032$, $P_3 = 0,057$) и приспособление ($P_4 = 0,079$, $P_5 = 0,090$), откуда следует вывод, что для увеличения значения вероятности ($P_1 = 0,175$) нахождения системы в состоянии безотказной работы необходима оптимизация данных параметров соответствующих подсистем.

В связи с этим, рассмотрим отдельно размеченные графы состояний инструмента в марковской и полумарковской системах (рисунки 3, а, б). Система включает в себя следующие состояния: S_1 – безотказная работа; S_2 – переналадка; S_3 – параметрический отказ; S_4 – отказ функционирования; α_1 – случайная величина (СВ) времени наработки на отказ; β_1 – СВ времени восстановления после отказа функционирования; α_3 – СВ времени до контроля момента параметрического отказа; α_4 – СВ времени до переналадки; β_4 – СВ времени переналадки.

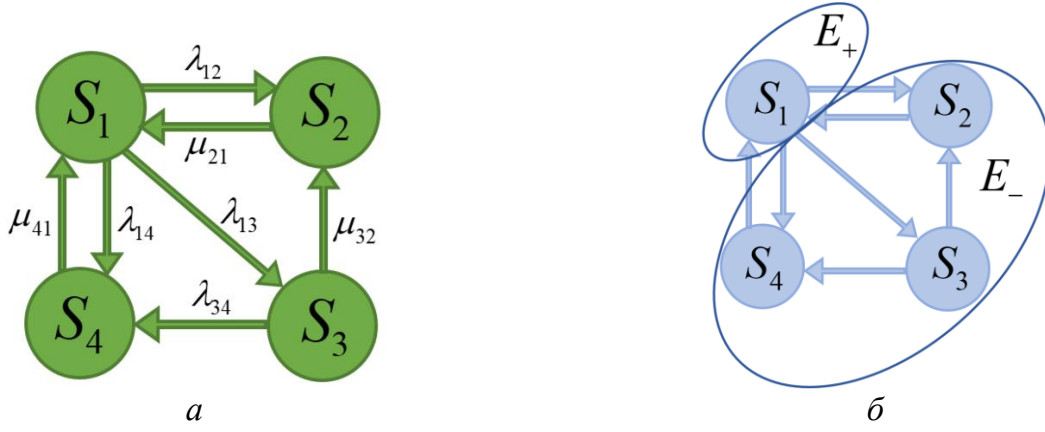


Рисунок 3 – Графы состояний инструмента: *а* – в марковской системе, *б* – в полумарковской системе

Уравнения для финальных вероятностей P_1, P_2, P_3, P_4 состояний S_1, S_2, S_3, S_4 представляются для марковской системы в следующем виде:

$$\begin{cases} (\lambda_{12} + \lambda_{13} + \lambda_{14}) \cdot P_1 = \mu_{21} \cdot P_2 + \mu_{41} \cdot P_4; \\ \mu_{21} \cdot P_2 = \lambda_{12} \cdot P_1 + \mu_{32} \cdot P_3; \\ (\mu_{32} + \lambda_{34}) \cdot P_3 = \lambda_{13} \cdot P_1; \\ \mu_{41} \cdot P_4 = \lambda_{34} \cdot P_3 + \lambda_{14} \cdot P_1. \end{cases} \quad (2)$$

На основе принятых значений, получим расчетные значения для финальных вероятностей системы уравнений: $P_1 = 0,703$, $P_2 = 0,002$, $P_3 = 0,003$, $P_4 = 0,290$, и коэффициента простоя $K_n = P_2 + P_3 + P_4 = 0,295$.

Для описания функционирования системы в полумарковском виде используем полумарковские состояния: $E = \{S_1, S_2, S_3, S_4\}$. Время пребывания в состояниях будет иметь вид: $\theta_1 = \alpha_1 \wedge \alpha_3 \wedge \alpha_4$; $\theta_3 = x \wedge y$; $\theta_4 = \beta_1$. 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 остаточные времена (непрерывные компоненты) будут равны: $x = \{\alpha_4 - \alpha_3\}^+$; $y = \{\alpha_1 - \alpha_3\}^+$, где x – остаточное время наработки системы до переналадки, y – остаточное время наработки системы до отказа. Отсюда функции распределения имеют вид:

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

где $R_i(t)$ и $r_i(t)$ – соответственно функция и плотность распределения СВ.

Определим вероятности переходов между состояниями 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:

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

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. С помощью данного метода, определим все траектории в подмножестве E_- и их вероятности с временем пребывания системы на этих траекториях. Траектории будут иметь вид: $T_1 = \{S_3 S_2\}$; $T_2 = \{S_3 S_4\}$; $T_3 = \{S_2\}$. Вероятности траекторий: $P_T^1 = P_3^2$; $P_T^2 = P_3^4$. Определим время пребывания системы в состояниях с учетом повторных попаданий, для чего сначала определим вероятности включения состояний в траектории: $P_S^1 = P_T^1$; $P_S^2 = P_T^1 + P_T^2$; $P_S^3 = P_T^2$.

Далее найдем коэффициенты увеличения времени пребывания системы в состояниях за счет повторных попаданий: $c_3 = \frac{\rho_3}{P_S^2 \cdot \rho_1}$; $c_4 = \frac{\rho_4}{P_S^3 \cdot \rho_1}$.

Определим плотности распределения времени 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:

$$f_T^1(s) = f_3^\theta(s); \quad f_T^2(s) = f_3^\theta(s) * f_4^\theta(s), \text{ где } * - \text{ знак операции свертки.}$$

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:

$$R_1(t) = \int_0^t r_1(t) dt; \quad R_2(t) = \int_0^t r_2(t) dt; \quad R_3(t) = \int_0^t r_3(t) dt; \quad R_4(t) = \int_0^t r_4(t) dt; \quad G_1(t) = \int_0^t g_1(t) dt,$$

соответствует обобщенный закон Эрланга второго порядка с параметрами $\lambda_1, \lambda_2; \lambda_3, \lambda_4; \lambda_5, \lambda_6; \lambda_7, \lambda_8; \lambda_9, \lambda_{10}$ соответственно с учетом зависимостей:

$$r_1(t) = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot (e^{-\lambda_1 t} \cdot e^{-\lambda_2 t})}{\lambda_2 - \lambda_1}, \quad r_2(t) = \frac{\lambda_3 \cdot \lambda_4 \cdot (e^{-\lambda_3 t} \cdot e^{-\lambda_4 t})}{\lambda_4 - \lambda_3},$$

$$r_3(t) = \frac{\lambda_5 \cdot \lambda_6 \cdot (e^{-\lambda_5 t} \cdot e^{-\lambda_6 t})}{\lambda_6 - \lambda_5}, \quad r_4(t) = \frac{\lambda_7 \cdot \lambda_8 \cdot (e^{-\lambda_7 t} \cdot e^{-\lambda_8 t})}{\lambda_8 - \lambda_7}, \quad g_1(t) = \frac{\lambda_9 \cdot \lambda_{10} \cdot (e^{-\lambda_9 t} \cdot e^{-\lambda_{10} t})}{\lambda_{10} - \lambda_9},$$

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

$$\text{Математическое ожидание (МО) будет иметь вид: } T_- = \frac{\sum_{i \in E_-} m_i \rho_i}{\sum_{k \in K \subset E_+} \sum_{j \in E_-} P_{kj} \rho_i}. \quad (3)$$

Математическое ожидание полученной нами функции распределения и математическое ожидание, определяемое с помощью выражения (3), совпадают по величине

и составляют 0,990 ч. Для верификации данной модели необходимо провести сравнение результатов аналитического и имитационного моделирования. Имитационную модель представим в среде AnyLogic (рисунок 4), которая 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. 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.

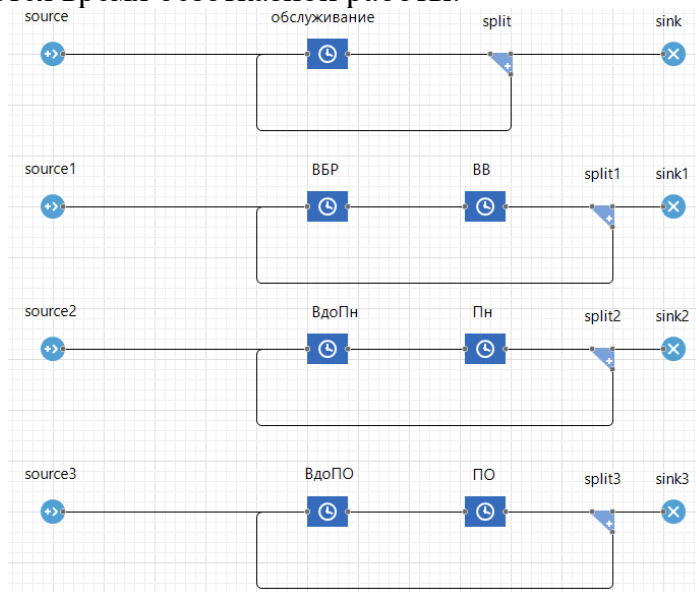


Рисунок 4 – Имитационная модель системы инструмента в AnyLogic

В результате моделирования получили математическое ожидание для аналитической модели $T_{-a} = 0,990$, а для имитационной $T_{-a} = 0,992$, при этом относительная погрешность равна 0,2%. Результаты аналитического и имитационного моделирования показывают, что расхождение полученных математических ожиданий времени нахождения системы в состоянии E_{-} в аналитической и имитационной моделях не превышает 0,5%, подтверждая достоверность аналитической модели. Коэффициент простоя для полумарковской системы

составляет: $K_n = \frac{m_{-}}{m_{-} + m_{+}} = 0,299$. Полученные результаты показывают, что коэффициент

простоя в полумарковской системе дает более точное значение, чем в марковской, по этой причине целесообразно использовать полумарковскую систему для дальнейших расчетов при оптимизации процесса формообразования мелкоразмерной внутренней резьбы в глухих глубоких отверстиях. Аналогичным образом были разработаны и рассчитаны показатели надежности для системы приспособления.

В третьей главе произведены экспериментальные исследования формообразования МРвГГО с целью получения данных о динамике изменения крутящих моментов и проверки адекватности теоретической модели нового способа МРвГГО как составляющей технологической системы. 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 (рисунок 5, а). Контроль крутящего момента в процессе резьбообработки деталей метчиком осуществлялся с использованием

установленной на рабочей поверхности стола специально разработанной конструкции динамометра с поворотной платформой и тензодатчиком модели FSS1500NSB (HoneyWell), подключенным к персональному компьютеру (ПЭВМ) через Arduino UNO (рисунок 5, б, в), что обеспечивает возможность в режиме реального времени наблюдать на выводимом в Arduino UNO графике изменения крутящего момента непосредственно в момент обработки.

Для проведения исследований использовались детали типа втулок из широко используемых в машино- и приборостроении материалов: алюминий АЛ 4, сталь 45 и нержавеющая сталь 34ХН3М. Для полной информации и объективной оценки предпочтительного варианта признанных наиболее рациональными структур – режущего метчика структуры I_1 типа Т880 с винтовыми канавками (рисунок 1, а), а также варианты структур I_2 , I_3 , (рисунок 1, б, в) необходим учет стохастических процессов, происходящих в реальных условиях функционирования.



Рисунок 5 – Общие виды экспериментальной установки (а) со схемой подключения тензодатчика к ПЭВМ через Arduino UNO (б) и рабочей зоной (в)

Поскольку выявленные на этапе структурно-компоновочного синтеза с помощью качественного критерия из сформированного множества вариантов для обработки МРвГГО три рациональных варианта отличаются только конструкциями типов метчиков, проведены 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 $M_{кр}$, приводящего к предельному затуплению зубьев и формированию внутренней резьбы с отклонениями по точности. Исходя из условий обработки и построенной ранее морфологической матрицы, резьбообразование может осуществляться тремя способами для каждого материала: резьбообразование с равномерной подачей, резьбообразование с прерывистой подачей и разработанным новым способом резьбообразования на основе программного управления с циклической подачей и удалением стружки на каждом цикле

(рисунок 6, а, б). Эта задача решается предлагаемым режущо-деформирующим метчиком структуры I_3 , снабженным зубьями обратного резания и получающим циклические движения ввинчивания и вывинчивания в обрабатываемое отверстие с подачей СОТС на инструмент.

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 показывают математические ожидания $M[T'_H]$ дискретных случайных величин времени T'_H между двумя отказами функционирования метчиков и дисперсию $D[T'_H]$, а также относительные частоты распределения $h(T'_H)$ для каждого варианта метчиков (рисунок 8, а), из которых следует преимущество режущо-деформирующих метчиков I_3 по показателям эксплуатационной надежности. Для режущего метчика математическое ожидание и дисперсия соответственно равны $M[T'_{H1}] = 7,9 \text{ мин}$, $D[T'_{H1}] = 8,1$, для деформирующего I_2 – $M[T'_{H2}] = 14,6 \text{ мин}$, $D[T'_{H2}] = 13,7$, а для режущо-деформирующего – $M[T'_{H3}] = 21,9 \text{ мин}$, $D[T'_{H3}] = 19,4$.

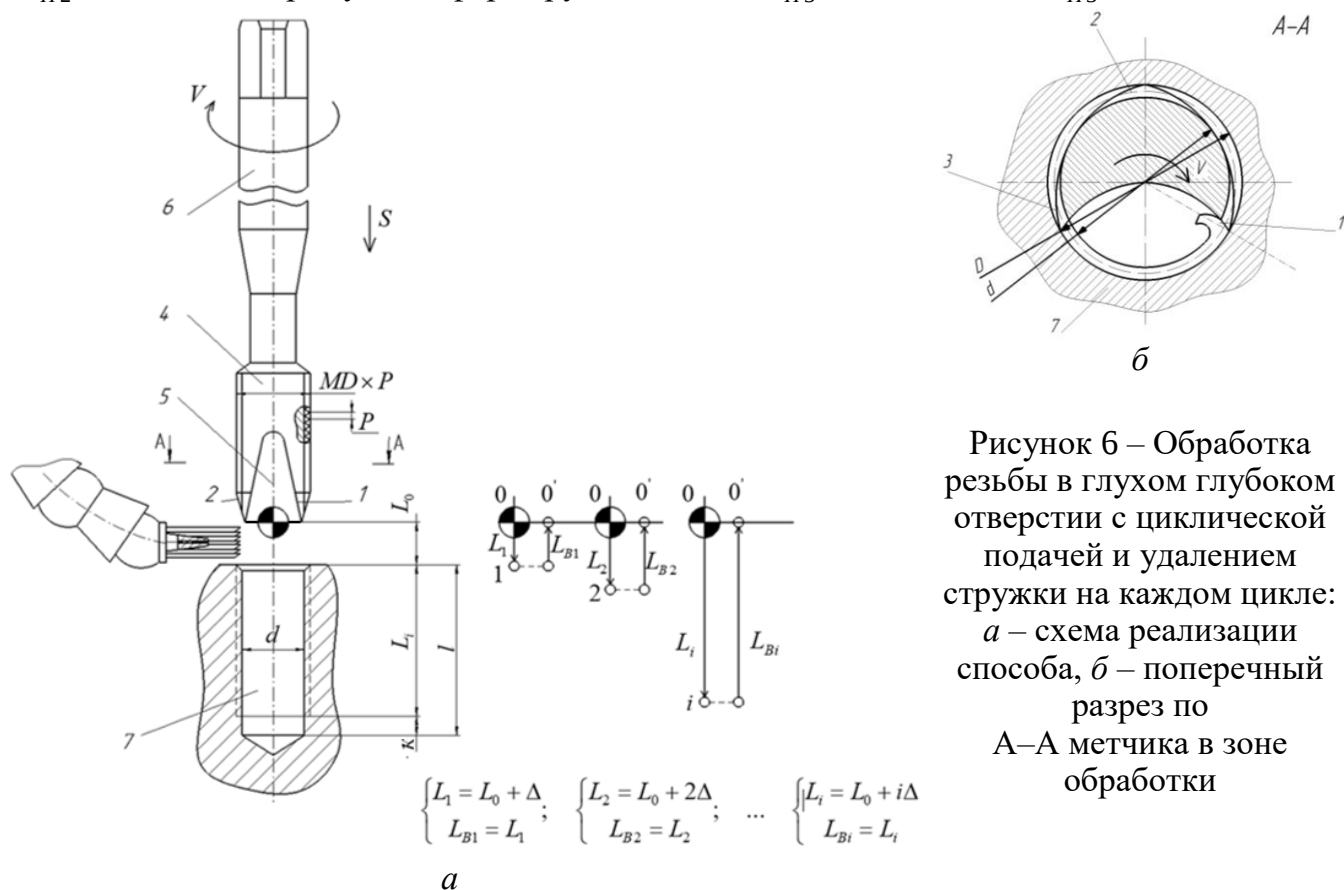


Рисунок 6 – Обработка резьбы в глухом глубоком отверстии с циклической подачей и удалением стружки на каждом цикле:
а – схема реализации способа, б – поперечный разрез по А–А метчика в зоне обработки

Исследования выявили самую высокую интенсивность отказов ($\lambda_1 = 0,1265 \text{ мин}^{-1}$) у режущих метчиков (I_1). При практически одинаковой интенсивности восстановления μ_1 лучшие показатели по надежности ($\lambda_1 = 0,0456 \text{ мин}^{-1}$) имеют режущо-деформирующие метчики (I_3).

Проведение аналогичных экспериментов по изучению причин возникновения параметрических отказов метчиков, законов распределения их величин позволило дополнить необходимой информацией процесс выбора их рациональных вариантов. К параметрическому отказу метчика приводит повышение предельной величины износа $U_{пр}$ 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 предварительно рассчитывали и сводили в таблицу. В результате исследований на экспериментальной установке выявлена общая закономерность увеличения суммарного крутящего момента $M_{кр}$ относительно величины его математического ожидания для каждого из метчиков ($1,82 \text{ Н} \cdot \text{м}$ для I_1 при $M_{кр.э} = 2,88 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $4,51 \text{ Н} \cdot \text{м}$ для I_2 при $M_{кр.э} = 8,10 \text{ Н} \cdot \text{м}$; $3,23 \text{ Н} \cdot \text{м}$ для I_3 при $M_{кр.э} = 5,49 \text{ Н} \cdot \text{м}$), что подтверждает характер полученных осциллограмм крутящего момента $M_{кр}$ во время обработки и в период наступления параметрического отказа.

Наиболее характерными видами параметрических отказов машинно-ручных метчиков были: наростообразование обрабатываемого материала на передних и боковых поверхностях зубьев; скалывание вершин зубьев; притупление кромок; оплавление кромок зубьев рабочей части. Для деформирующих метчиков было характерным явление наростообразования на заборном и калибрующем участках. Для режуще-деформирующих метчиков 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. Вследствие этого увеличиваются размеры образуемых резьб, а затем происходит заклинивание рабочей части метчика в обрабатываемой детали и поломка его. 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.

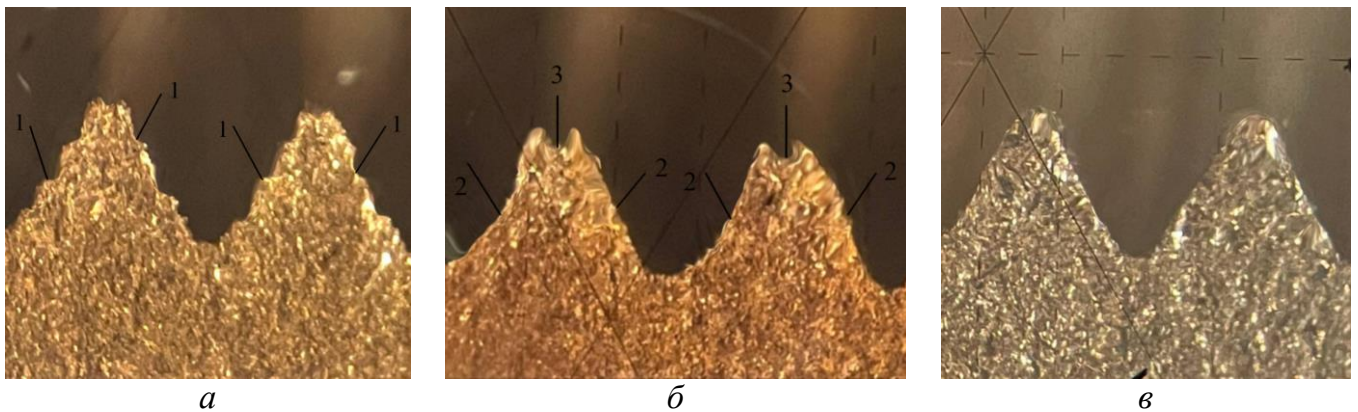


Рисунок 7 – Микрошлифы профилей резьбы, полученной режущим (а), деформирующим (б) и режуще-деформирующим (в) метчиками

Микрошлиф резьбового отверстия М5, полученного режущим метчиком (рисунок 7, а) на боковых сторонах профиля содержит характерные ступени 1, соответствующие механизму образования погрешностей в виде подрезания профиля. Микрошлиф рабочей части профиля в осевой плоскости, проходящей через средний диаметр резьбы, полученной деформирующим метчиком (рисунок 7, б) имеет криволинейные боковые стороны профиля 2 и содержат кратеры 3 на вершинах профиля резьбы, что подтверждает теоретические предпосылки о механизме искажений профиля резьбы такими метчиками. Профиль резьбы М5 в алюминиевых сплавах, полученной с помощью режуще-деформирующего метчика (рисунок 7, в), не содержит видимых погрешностей, характерных для обработки резьб, полученных режущими или деформирующими метчиками и соответствует требуемым параметрам, определяемым по ГОСТу.

Результаты статистического исследования трех вариантов метчиков на технологическую надежность, показывают математические ожидания дискретных случайных величин времени между двумя параметрическими отказами метчиков. Дисперсия при этом отличается от соответствующего математического ожидания на 56%, 24% и 23%, что с некоторым допущением может свидетельствовать о распределении случайной величины по закону Пуассона. Для режущего метчика математическое ожидание и дисперсия соответственно равны $M[T_{И1}^{//}] = 6,2 \text{ мин}$, $D[T_{И1}^{//}] = 9,7$, для деформирующего – $M[T_{И2}^{//}] = 10,2 \text{ мин}$, $D[T_{И2}^{//}] = 7,9$, а для режуще-деформирующего – $M[T_{И3}^{//}] = 18,3 \text{ мин}$, $D[T_{И3}^{//}] = 22,6$. Для статистического описания процесса возникновения параметрического отказа строили график относительных частот распределения для каждого варианта метчиков (рисунок 8, б). Анализ графических зависимостей показал, что относительные частоты времени между параметрическими отказами для машинно-ручных метчиков ($И_1$), деформирующих ($И_2$) и режуще-деформирующих метчиков ($И_3$) подчиняются гамма-распределению, частным случаем которого является распределение Эрланга.

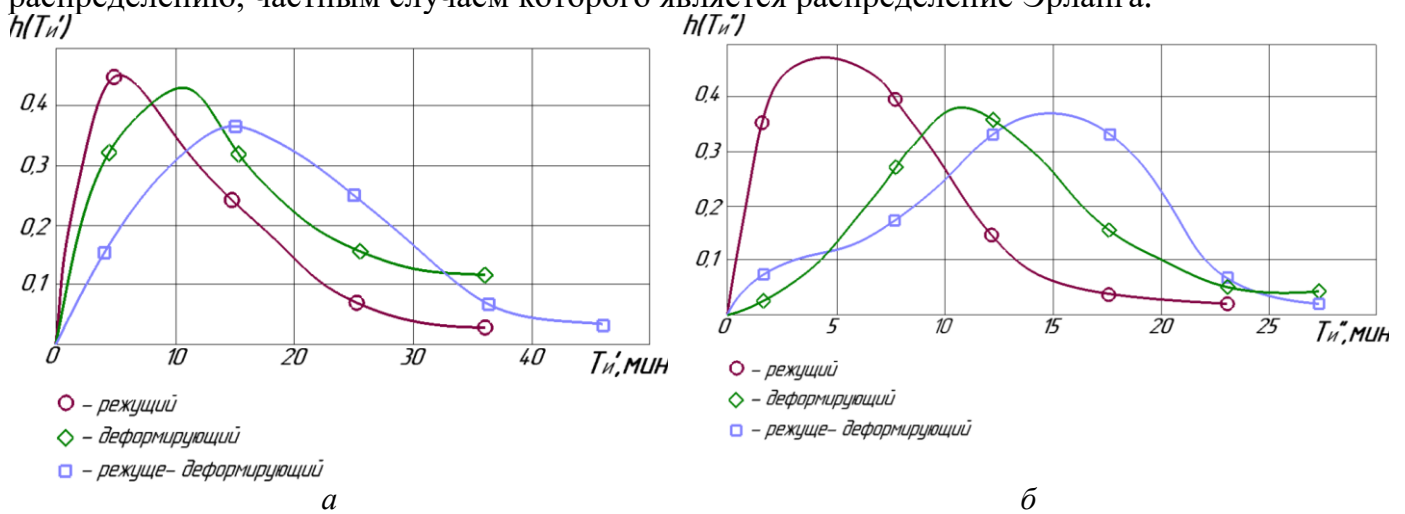


Рисунок 8 – Относительные частоты распределения времени между отказами функционирования метчиков (а) и между параметрическими отказами (б)

Так, самая высокая интенсивность отказов ($\lambda_1 = 0,1612 \text{ мин}^{-1}$) зафиксирована у машинно-ручных метчиков. При близкой по значениям интенсивности восстановления μ_1 лучшие показатели по надежности ($\lambda_1 = 0,0546 \text{ мин}^{-1}$) имеют режуще-деформирующие метчики. Исследование величин крутящих моментов при формообразовании МРвГТО позволило определить закономерности его изменения от скорости резания (рисунок 9, а, б, в), и от диаметра исходного цилиндрического отверстия (рисунок 11). Крутящий момент при увеличении скорости до $V = 0,07 \text{ м/с}$ при нарезании резьб режущими метчиками (рисунок 9, а) уменьшается на 16 %, а затем – при дальнейшем ее повышении – практически не меняется. Дисперсия крутящего момента увеличивается при увеличении скорости резбонарезания, достигая максимума при $V = 0,16 \text{ м/с}$. При формировании резьб деформирующими метчиками (рисунок 9, б) крутящий момент при увеличении скорости до $V = 0,11 \text{ м/с}$ возрастает на 30 % и при дальнейшем повышении её практически не меняется. Аналогичный характер изменения величин крутящих моментов $M_{кр}$ наблюдается при обработке резьб режуще-деформирующими метчиками (рисунок 9 в), однако приращение силовых характеристик составляет 10 %, что объясняется особенностью схемы обработки. Влияние диаметра исходного отверстия $D_{отв}$ под образование резьбы деформирующими метчиками на величину крутящего момента при резбоформировании (рисунок 10) имеет вид экспоненциальной зависимости, резко возрастающей при уменьшении $D_{отв}$.

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 наиболее рациональными вариантов структур метчиков I_1 , I_2 , I_3 и проверке адекватности теоретической модели нового способа резбообразования на основе программного управления с циклической подачей и удалением стружки на каждом цикле в сравнении с ранее известными – резбообразованием с равномерной подачей и резбообразованием с прерывистой подачей. Средние значения по основным динамическим показателям и времени цикла для каждого варианта инструмента и обрабатываемых материалов при трех разных способах обработки в глухих глубоких отверстиях представлены в таблице 1. Математические ожидания наработки на отказ функционирования $M[T_{II}']$ и параметрический отказ $M[T_{II}^{II}]$, а также соответствующие значения математического ожидания времени восстановления метчиков после отказа функционирования $M[T_{BII}']$ и после параметрического отказа $M[T_{BII}^{II}]$ сведены в таблицу 2.

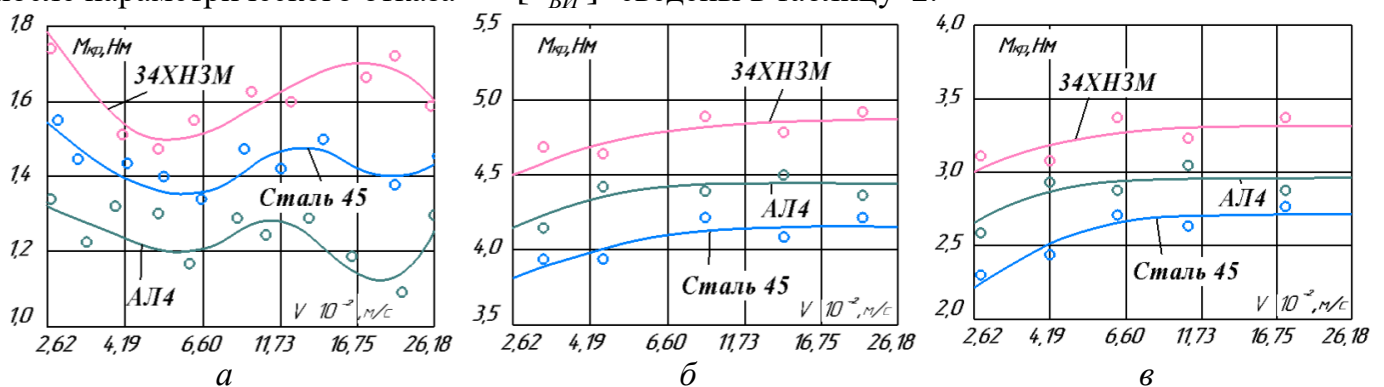


Рисунок 9 – Зависимость крутящего момента $M_{кр}$ от скорости резбообразования метчиком М5 режущим (а), деформирующим (б), режуще-деформирующим (в)

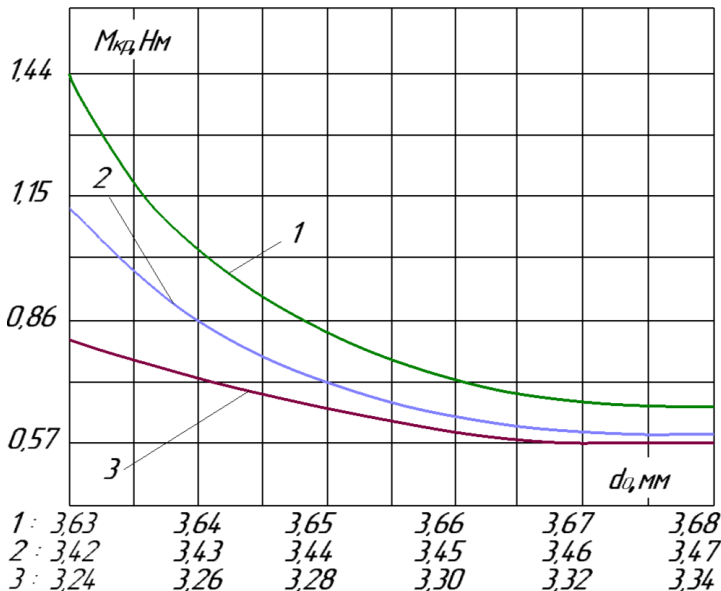


Рисунок 10 – Влияние диаметра исходного цилиндрического отверстия на крутящий момент при резбообразовании метчиками: 1 – деформирующим; 2 – режуще-деформирующим; 3 – режущим

На рисунке 11 показаны экспериментальные образцы после резбообразования в обрабатываемых материалах новым способом. Диаграммы изменения при МРВГТО крутящих моментов и времени цикла для разных способов подачи, материалов и видов инструмента (рисунок 12, а, б), параметров потоков отказов функционирования и восстановлений, а также параметрических отказов и восстановлений (рисунок 13, а, б) представлены на графиках, построенных с помощью значений, полученных во время эксперимента.

Для исследованных 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). Также для них наблюдается увеличение времени цикла $T_{ц}$ 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).

Таблица 1 – Результаты экспериментальных исследований метчиков по динамике изменения крутящих моментов $M_{кр.мах}$ и времени цикла $T_{ц}$

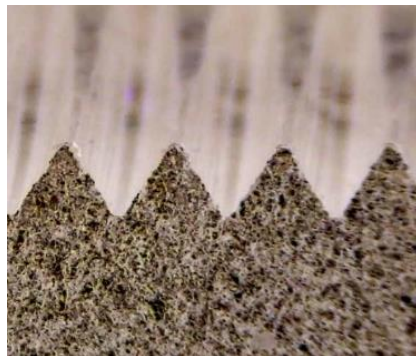
№ п/п	Способ подачи	Материал	$M_{кр.мах}, Нм$			$T_{ц}, мин$		
			I_1	I_2	I_3	I_1	I_2	I_3
1.	Равномерная	Сталь 45	1,56	3,82	2,54	0,37	0,39	0,38
		34ХНЗМ	1,82	4,51	3,23	0,31	0,33	0,32
		АЛ4	1,32	4,12	2,84	0,28	0,26	0,27
2.	Прерывистая	Сталь 45	1,31	3,94	2,14	0,42	0,43	0,44
		34ХНЗМ	1,63	4,47	2,45	0,38	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 2 – Результаты экспериментальных исследований метчиков по параметрам потоков отказов и восстановлений

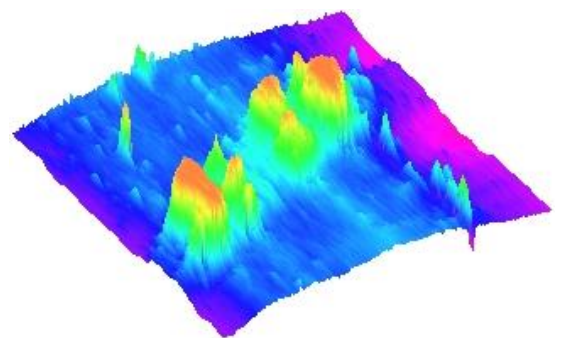
№ п/п	Способ подачи	Материал	$M[T'_{II}]_{мин} / M[T'_{ВИ}]_{мин}$			$M[T''_{II}]_{мин} / M[T''_{ВИ}]_{мин}$		
			I_1	I_2	I_3	I_1	I_2	I_3
1.	Равномерная	Сталь 45	7,9/1,8	14,6/2,1	21,9/1,9	6,2/1,9	10,4/1,2	18,3/1,3
		34ХНЗМ	6,6/1,8	13,3/2,1	16,8/1,9	5,2/1,9	9,5/1,2	14,1/1,3
		АЛ4	8,2/1,8	18,9/2,1	39,2/1,9	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



а



б



в

Рисунок 11 – Экспериментальный образец: а – общий вид в разрезе; б – вид структуры через микроскоп МЕГЕОН 33102; в – 3D-изображение структуры поверхности резьбы

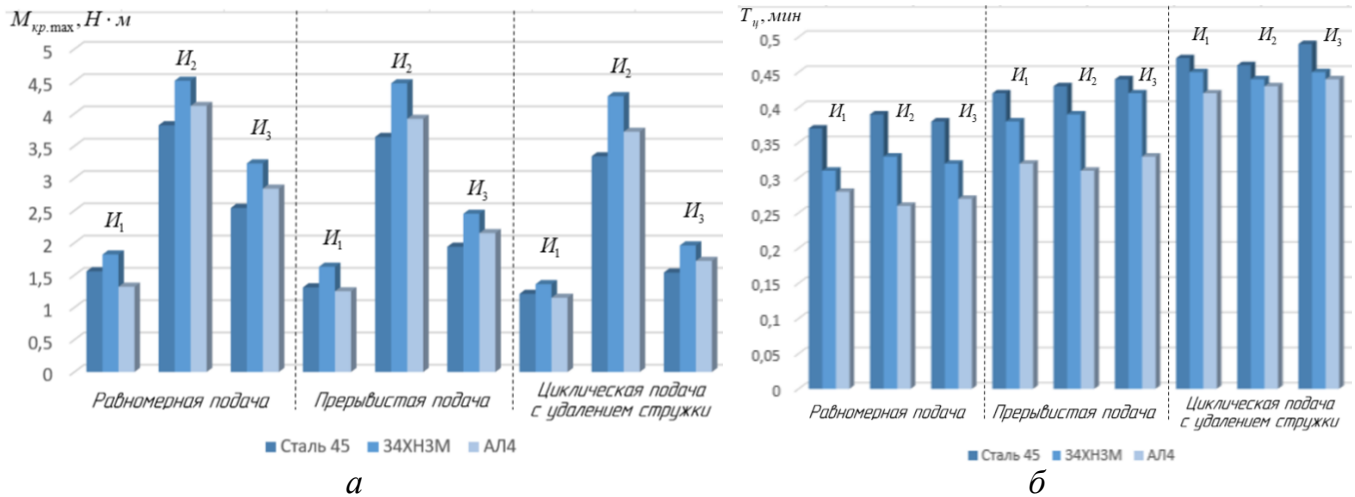


Рисунок 12 – Диаграммы зависимостей изменения при МРВГГО крутящих моментов $M_{кр. max}$ (а) и времени цикла $T_{ц}$ (б) для разных способов подачи, материалов и видов инструмента

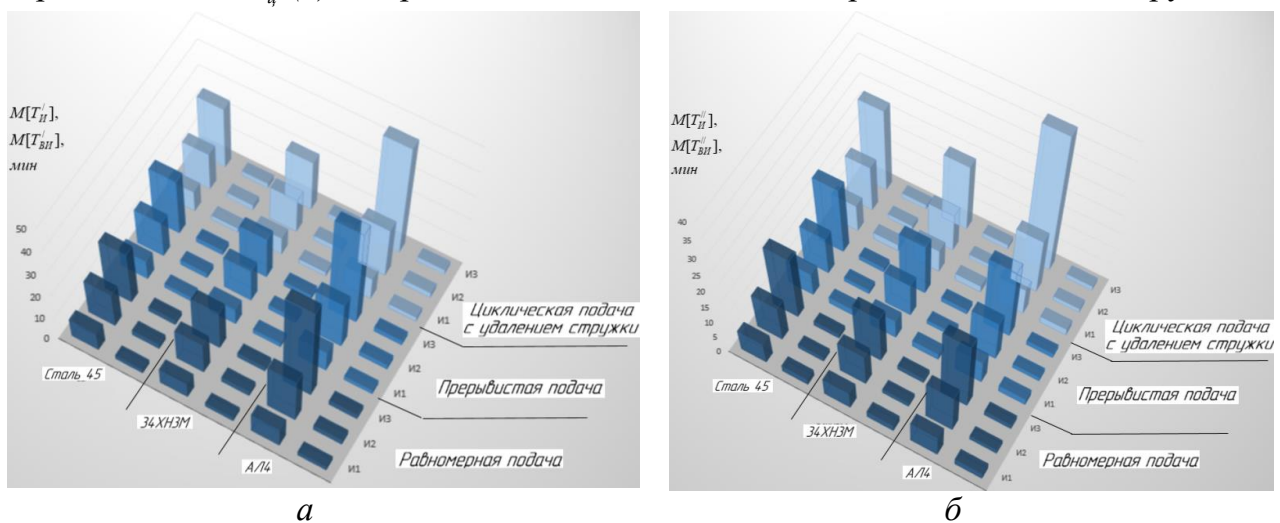


Рисунок 13 – Диаграммы зависимостей изменения параметров потоков отказов функционирования и восстановлений (а), а также параметрических отказов и восстановлений (б) от марки обрабатываемого материала и способов подачи метчика

Для всех исследованных обрабатываемых материалов режуще-деформирующими метчиками I_3 наблюдается возрастание величины наработки на отказ функционирования $M[T_{II}']$ 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 ($M[T_{BI}'] = 1,9$ мин).

Для исследованных обрабатываемых материалов режуще-деформирующими метчиками I_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 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.

В четвертой главе рассматривается программная реализация алгоритма оптимизации процесса МРВГГО с учетом полученных в предыдущей главе результатов экспериментальных исследований.

Реализацию алгоритма проводили путем машинного эксперимента с использованием полученных значений результатов интенсивностей потоков отказов λ и восстановления μ и на основе разработанных моделей и размеченных графов состояний в марковской и в полумарковской системах. С помощью более точной полумарковской модели получены значения коэффициентов простоя K_n 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 более высокими значениями (соответственно 0,389 и 0,396). 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 с применением разработанных моделей и размеченных графов состояний в марковской и в полумарковской системах для способов подачи, марки материалов и видов инструмента (таблица 3).

Таблица 3 – Значения коэффициентов простоя K_n , полученные в результате машинного эксперимента для способов подачи, марки материалов и видов инструмента

№ 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

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 для каждого из трех марок выбранных представительных материалов по критерию минимального коэффициента простоя $K_n \rightarrow \min$, чем обеспечена возможность повышения эффективности формообразования МРВГГО. В частности, наиболее эффективное преимущество (от 2,18 до 3,39 раз) выявлено при обработке отверстий в заготовках из алюминиевого сплава АЛ4. Эффективность формообразования достигается снижением погрешностей формы и размеров образуемого резьбового профиля за счет уменьшения его подрезания и отсутствия кратеров на вершинах, а также снижения отклонений среднего диаметра резьбы и шероховатости на боковых сторонах профиля. Повышается надежность технологической системы по критерию минимального коэффициента простоя за счет рациональных вариантов метчиков и нового способа нарезания резьб в глухих глубоких отверстиях.

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 позволил 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.

5. Выполнены экспериментальные исследования с помощью специальной установки на станке мод. МАХХmill 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 режуще-деформирующими метчиками наблюдается возрастание величины наработки на отказ функционирования при переходе от способа резьбообразования с равномерной подачей к способу (решение от 1.04.2026 о выдаче патента на изобретение по заявке №2025118732/05(044038) от 04.07.2025) с циклической подачей и удалением стружки на каждом цикле в 1,14...1,22 раза при практически неизменяющемся времени восстановления $M[T'_{\text{вн}}] = 1,9 \text{ мин.}$

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 $M[T'_{\text{вн}}] = 1,3 \text{ мин.}$ 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 режуще-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 РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых журналах и изданиях, включенных в перечень ВАК РФ

1. 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. – EDN MNJONU. (ВАК)
2. Мирзоян, Н. Ю. Анализ надежности инструмента при мелкоразмерном внутреннем резбонарезании метчиком / Н. Ю. Мирзоян, М. В. Заморенов, А. О. Харченко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 9. – С. 625-628. – DOI 10.24412/2071-6168-2024-9-625-626. – EDN CBHMQ. (ВАК)
3. Мирзоян, Н. Ю. Имитационная модель для анализа надежности инструмента при резбонарезании метчиком в глухих отверстиях / Н. Ю. Мирзоян, М. В. Заморенов, А. О. Харченко // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2024. – № 10. – С. 38-40. – DOI 10.24412/2071-6168-2024-10-38-39. – EDN CHOSXF. (ВАК)
4. Мирзоян, Н. Ю. Анализ надёжности системы станка при мелкоразмерном резбонарезании в глухих отверстиях / Н. Ю. Мирзоян, А. О. Харченко, М. В. Заморенов // Транспортное машиностроение. – 2025. – № 5(41). – С. 4-14. – DOI 10.30987/2782-5957-2025-5-4-14. – EDN VZAWCA. (ВАК)
5. 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. – DOI 10.24412/2071-6168-2025-12-515-520. – EDN ZKDNCW. (ВАК)
6. 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. – DOI 10.24412/2071-6168-2025-12-557-558. – EDN VDPSWK. (ВАК)

Статьи и материалы конференций, опубликованные в других изданиях

7. Мирзоян, Н. Ю. Надёжность инструмента при резбонарезании в глухих отверстиях / Н. Ю. Мирзоян, А. О. Харченко // Вестник современных технологий. – 2024. – № 3(35). – С. 13-18. – EDN HZQKAW.
8. Мирзоян, Н. Ю. Синтез технологической системы мелкоразмерной резбобработки в глухих глубоких отверстиях на основе морфологического анализа / Н. Ю. Мирзоян, А. О. Харченко // Вестник современных технологий. – 2025. – № 1(37). – С. 4-11. – EDN HZQKAW.
9. Мирзоян, Н. Ю. Синтез технологической системы мелкоразмерной резбобработки 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. – EDN HZQKAW.

Мирзоян Наталия Юрьевна

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

Автореферат отпечатан с разрешения диссертационного совета 24.4.393.01. ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет» (протокол № 48 от 22.05.2026 г.)
Издательство и типография ООО «РИБЕСТ» 299014, г. Севастополь, ул. Рыбаков, 7.
Формат 60×84 1/16. Усл. печ. лист. 1,3. Бумага офсетная. Тираж 120 экз. Зак. №51