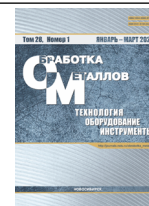




Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Выбор метода чистовой обработки отверстий в условиях многономенклатурного производства на основе решения многокритериальной оптимизационной задачи

Вадим Стельмаков ^{a, *}, Михаил Гимадеев ^b

Тихоокеанский государственный университет, ул. Тихоокеанская, 136, г. Хабаровск, 680035, Россия

^a  <https://orcid.org/0000-0003-2763-1956>,  009062@togudv.ru; ^b  <https://orcid.org/0000-0001-6685-519X>,  009063@togudv.ru

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.91:681.5

История статьи:

Поступила: 26 ноября 2025

Рецензирование: 12 декабря 2025

Принята к печати: 27 декабря 2025

Доступно онлайн: 15 марта 2026

Ключевые слова:

Точность формы

Оптимизация

Генетический алгоритм

Парето-фронт

Чистовая обработка

Финансирование

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № FEME–2024–0010).

АННОТАЦИЯ

Введение. В современном машиностроении, особенно в условиях многономенклатурного производства, разработка технологических процессов обработки отверстий остается сложной задачей. Высокие требования к точности формы, расположению осей и шероховатости поверхностей требуют применения различных методов чистовой обработки, таких как растачивание и развертывание. Однако, исходя из современного состояния исследований в области обработки отверстий, появляется еще один перспективный метод – фрезерование с использованием различных стратегий. Каждый из этих методов обладает уникальными преимуществами и ограничениями в отношении достигаемой точности, производительности и экономической эффективности. В условиях усиления конкуренции и необходимости быстрого реагирования на изменения рыночной конъюнктуры предприятия сталкиваются с необходимостью оптимизации технологических процессов. Это особенно актуально для операций обработки отверстий, составляющих значительную долю в общей трудоемкости изготовления деталей. **Предмет.** В статье исследуется подход к выбору оптимального метода чистовой обработки отверстий (растачивание, развертывание, фрезерование с круговой и винтовой интерполяцией) на основе решения многокритериальной оптимизационной задачи. Особое внимание уделяется влиянию количества обрабатываемых отверстий на результат решения оптимизационной задачи. **Цель работы:** разработка подхода к выбору метода чистовой обработки отверстий исходя из достигаемой точности формы, себестоимости и производительности за счет решения задачи структурной оптимизации применительно к условиям многономенклатурного производства. **Метод и методология.** Подход основан на методах математической статистики, используемых при построении регрессионных моделей для установления влияния режимов обработки на отклонения от круглости и цилиндричности для каждого исследуемого метода обработки. Для нахождения множества оптимальных решений по Парето применяется генетический алгоритм, а для выбора итогового варианта – метод идеальной точки. **Результаты и обсуждение.** В результате решения оптимизационной задачи установлено, что при наличии в партии от 1 до 30 высокоточных отверстий оптимальным является фрезерование с винтовой интерполяцией, а для партий от 40 и более отверстий – растачивание. Получены рекомендации в части выбора режимов обработки для каждого из оптимальных методов. Разработанный подход позволяет обоснованно выбирать метод обработки на этапе технологической подготовки производства, что сокращает трудоемкость проектирования и повышает экономическую эффективность.

Для цитирования: Стельмаков В.А., Гимадеев М.Р. Выбор метода чистовой обработки отверстий в условиях многономенклатурного производства на основе решения многокритериальной оптимизационной задачи // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2025. – Т. 28, № 1. – С. 46–63. – DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28.1-46-63.

Введение

Задачи проектирования и разработки технологических процессов (ТП) обработки отверстий занимают особое место среди всего

многообразия проблем современной технологии машиностроения. Повышенное внимание к этому типу ТП обусловлено прежде всего служебным назначением обрабатываемых поверхностей. Поскольку эти поверхности чаще всего обеспечивают взаимное расположение деталей, сборочных единиц и изделий в машинах и механизмах, то достижение показателей точности и качества является важной задачей, успешное

*Адрес для переписки

Стельмаков Вадим Александрович, к.т.н., доцент
 Тихоокеанский государственный университет,
 ул. Тихоокеанская, 136,
 680035, г. Хабаровск, Россия
 Тел.: +7 962 221-74-60, e-mail: 009062@togudv.ru

решение которой непосредственно окажет влияние на долговечность и эксплуатационную надежность механизма.

Традиционно обработка высокоточных отверстий проводится в три основных этапа – черновой, получистовой и чистовой – с применением различного по компоновке оборудования, определенных видов режущего инструмента и вспомогательной оснастки. Вопросам проектирования технологических процессов обработки, в том числе высокоточных отверстий, посвящены работы [1–6]. Анализ упомянутых работ показывает, что достижение требуемых параметров точности отверстий представляет собой трудоемкую операцию, требующую использования разнообразного режущего инструмента (сверл, разверток, расточных резцов, зенкеров), что, в свою очередь, повышает и трудоемкость проектирования ТП.

Однако в условиях рыночных отношений с усилением конкурентной борьбы предприятий на рынке механообрабатывающей промышленности требуют от последних быстрого адекватного реагирования на изменения конъюнктуры рынка, сокращения времени на проектирование ТП, а также на изготовление продукции. Это непосредственно связано со стремлением к созданию конкурентоспособной и кастомизированной продукции с повышенными требованиями к точности и качеству изготовления. В этой связи предприятия с многономенклатурным производственным процессом попадают в ситуацию, когда необходимо сохранить возможность выпуска широкого спектра изделий, поддерживая уровень конкурентоспособности за счет снижения себестоимости и трудоемкости проекторочных операций по составлению маршрутов обработки. В таких условиях применение традиционных маршрутов обработки отверстий не всегда удовлетворяет требованиям к скорости, себестоимости и переналаживаемости производственного процесса.

Поэтому необходимо рассматривать современный уровень развития техники с нескольких позиций. Во-первых, это многофункциональность металлорежущего оборудования и возможности современных систем с ЧПУ. Во-вторых, применение многофункционального режущего инструмента. В-третьих, возможности современных САПР ТП. Перечисленные три аспекта

являются ключевыми для многономенклатурного производственного процесса.

Многофункциональные обрабатывающие центры с ЧПУ позволяют осуществлять механическую обработку сложных корпусных деталей с уменьшением количества установов и расширением спектра обрабатываемых поверхностей. Однако в силу экономических факторов применение узкопрофильного инструмента для обработки отверстий не всегда целесообразно, так как это увеличивает номенклатуру инструментов, загружает инструментальный магазин станка и повышает время наладки. Современные тенденции обуславливают необходимость использования многофункциональных режущих инструментов, позволяющих проводить обработку большого числа поверхностей с различным размерным рядом. Таким образом, возникает потребность в правильном выборе методов обработки, а также, что немаловажно, и стратегий механической обработки. Например, сверление отверстий можно заменить фрезерованием с винтовой интерполяцией, тем самым подготовив отверстия к чистовым операциям. Этот аспект важен и с точки зрения достижения заданных параметров точности и качества обработанных поверхностей.

К параметрам точности отверстий относятся диаметральный размер, форма, расположение оси и шероховатость поверхности. Под точностью геометрической формы понимаются макроотклонения, для отверстий они обычно нормируются допусками на круглость и цилиндричность. В рамках настоящего исследования рассмотрены высокоточные отверстия, точность диаметра которых соответствует качествам IT6...IT7. При этом погрешность геометрической формы, как правило, не превышает 0,3...0,5 от допуска на диаметральный размер, допуск на расположение оси находится в пределах 0,008...0,025 мм, а шероховатость поверхности составляет $Ra = 1,1...1,6$ мкм. Обеспечение заданных параметров точности формы является задачей этапа чистовой обработки, для которого традиционно используются такие методы, как развертывание и растачивание. Однако в работах [7–15] описываются подходы к применению различных стратегий фрезерования с целью определения их места в маршрутах механической обработки, анализируются кинематика и динамика

процесса фрезерования, дается оценка достижения диаметральных размеров и расположения оси отверстия.

В работе [7] показано, что фрезерование с винтовой интерполяцией является высокоэффективной альтернативой традиционному сверлению, которая обеспечивает существенное улучшение качества отверстий за счет уникальной кинематики процесса, сочетающей осевую подачу и радиальное движение инструмента. В работе [8] показано, что отклонение диаметрального размера при фрезеровании с винтовой интерполяцией является следствием деформации инструмента под действием радиальной силы резания. Авторами установлено, что выбор направления фрезерования также оказывает влияние на итоговый диаметральный размер (при встречном фрезеровании диаметр отверстия превышает номинальный, при попутном – оказывается меньше). На основе анализа кинематики и силового воздействия авторами разработана прогностическая модель, позволяющая с высокой точностью определять диаметр отверстия на любой глубине в зависимости от режимов резания и направления фрезерования.

На основе геометрического моделирования в работе [9] установлено, что соотношение объемов материала, удаляемых торцевой и периферийной частями режущих кромок фрезы, является постоянной величиной, зависящей исключительно от соотношения диаметров обрабатываемого отверстия и инструмента и не зависящей от режимов резания. Это соотношение закладывает основу для создания моделей силового воздействия с целью компенсации отклонений траектории инструмента и оптимизации процесса. В работе [10] исследуется применение фрезерования с винтовой интерполяцией для обработки углепластиков и титановых сплавов.

В работе [11] представлено численное моделирование и экспериментальное исследование сил резания при фрезеровании с винтовой интерполяцией. Основное внимание уделено разработке математической модели сил резания, которая учитывает одновременное воздействие как периферийных, так и торцевых режущих кромок инструмента. Модель также учитывает кинематику процесса, связанную с вращением шпинделя и спиральной траекторией инструмента. Проведенные эксперименты подтвердили

адекватность модели, показав хорошее соответствие с результатами численного моделирования (погрешность около 10 %).

В работе [12] исследуется фрезерование отверстий с винтовой интерполяцией в композитных материалах SiCp/Al. Установлено, что качество поверхности отверстия улучшается с ростом частоты вращения (шероховатость снижается на 17,13 % при увеличении частоты с 500 до 2000 об/мин) и ухудшается с увеличением шага спирали (шероховатость возрастает на 68,86 % при росте шага с 0,1 до 0,4 мм). В работе [13] разработана математическая модель, которая учитывает взаимосвязи силы резания и вибраций при фрезеровании с винтовой интерполяцией.

Авторами [14] разработана математическая модель для расчета глубин резания и объемов снимаемого материала. Модель учитывает разделение зоны резания на несколько областей в зависимости от варьирования такими параметрами, как шаг спирали (a_p) и эксцентриситет (e).

В работе [15] представлено исследование, которое посвящено моделированию топографии поверхности, получаемой при обработке отверстий методом фрезерования по спирали. В статье разработана методика построения трехмерной симуляции поверхности, формируемой после обработки цилиндрической концевой фрезой с учетом кинематики инструмента и погрешности его биения.

Авторами [16] исследован процесс формообразования цилиндрических отверстий при чистовом фрезеровании с круговой интерполяцией. Установлено, что точность формы существенно зависит от параметров врезания инструмента (радиуса, угла и подачи) и упругих деформаций режущего инструмента. На основе экспериментальных исследований и математического моделирования даны рекомендации по выбору каждого из параметров. Разработанная регрессионная модель и модель упругих деформаций инструмента позволяют прогнозировать отклонения от круглости и цилиндричности с точностью до 15 %.

Таким образом, метод фрезерования с различными стратегиями обладает следующими преимуществами: универсальностью (концевой фрезой одного номинального диаметра можно получать отверстия разных диаметров), а также

с учетом подбора режимов обработки и возможностью обеспечения высокой производительности. Основным же недостатком метода является ограничение по глубине обработки. Учитывая многообразие работ, посвященных фрезерованию отверстий, вопрос применимости этих методов (стратегий) для чистовой обработки с позиций достигаемой точности и производительности остается недостаточно изученным.

Метод растачивания характеризуется широким разнообразием конструкций инструмента, выбор которых зависит от диаметра и глубины обрабатываемого отверстия. Особенность расточного инструмента – возможность точной регулировки положения режущей кромки, что позволяет достигать высокой точности обработки. Как отмечено в работах [17, 18], критически важным фактором при растачивании является контроль стружкообразования. В работе [17] разработана аналитическая модель расчета сил резания, учитывающая траекторию движения инструмента и процесс разрушения стружки. Образование короткой и толстой стружки приводит к возрастанию силы резания и вибрациям, в то время как длинная стружка, накапливаясь, ухудшает качество поверхности отверстия.

На чистовых операциях существенным фактором становится риск возникновения вибраций, вызванных некорректным выбором геометрии режущей пластины, в частности значения главного угла в плане и радиуса при вершине. Увеличение радиуса при вершине, как показано в исследованиях [19–21], обуславливает рост радиальной составляющей силы резания и величины упругого отжима системы. Это, в свою очередь, провоцирует вибрации, снижая точность и ухудшая качество поверхности.

Таким образом, к основным преимуществам растачивания относятся возможность точной настройки на исполнительный размер и обеспечение высокого качества поверхности. Главный недостаток – высокая стоимость инструмента, что становится ключевым экономическим ограничением при применении данного метода в условиях многономенклатурного производства.

Метод развертывания является высокопроизводительным. Качество операции развертывания в значительной степени определяется состоянием предварительно обработанного отверстия [4–6]. Данный метод повышает каче-

ство поверхности обрабатываемого отверстия. В отличие от расточного инструмента, развертки позволяют использовать повышенные подачи и не требуют трудоемкой регулировки на исполнительный размер на обрабатываемом центре. Однако, обеспечивая высокую точность по диаметру, развертывание не позволяет скорректировать отклонения в расположении оси отверстия. Как установлено в работах [22–24], несоосность шпинделя станка и обрабатываемого отверстия существенно влияет на радиальную составляющую силы резания, что, в свою очередь, приводит к значительным отклонениям от круглости. Таким образом, в процессе развертывания точность расположения оси может не только не улучшиться, но и ухудшиться. Еще одним немаловажным фактором, особенно для многономенклатурного производства, является узкая специализация разверток: для каждого диаметра требуется отдельный инструмент, что увеличивает номенклатуру и затраты на оснащение.

Исходя из вышесказанного можно заключить, что каждый из методов чистовой обработки имеет свои преимущества и недостатки. Например, растачивание позволяет получить высокую точность диаметрального размера, формы и расположения оси, однако стоимость инструмента и трудоемкость его настройки будет играть ключевую роль при его выборе. Фрезерование со стратегиями круговой и винтовой интерполяции может обеспечить как высокую производительность, так и высокую точность. Развертывание на чистовых операциях позволяет достигать высоких показателей качества и производительности, но имеет ряд недостатков, связанных с отсутствием универсальности для различных диаметров отверстий.

Резюмируя, можно говорить, что выбор метода обработки отверстий на обрабатывающих центрах с ЧПУ зависит от многих факторов, и одними из главных, помимо достигаемых показателей точности и качества, являются экономическая составляющая стоимости его обработки (включающая в себя амортизацию инструментальной оснастки, стоимость часа работы оборудования, стоимость режущего инструмента и комплектующих) и производительность. Для многономенклатурного типа производства использование высокопроизводительного дорогостоящего инструмента не всегда представляется

возможным, поэтому метод фрезерования является хорошей альтернативой. Однако, учитывая все многообразие полученных к настоящему моменту решений, общий подход к составлению маршрута обработки с выбором методов и стратегий обработки для достижения заданных параметров точности в условиях многономенклатурного производства требует дальнейшей проработки.

Таким образом, *цель настоящей работы* – разработка подхода к выбору метода чистовой обработки отверстий исходя из достигаемой точности формы, себестоимости и производительности за счет решения задачи структурной оптимизации применительно к условиям многономенклатурного производства.

Решать задачу оптимизации будем исходя из множества критериев оптимальности (более двух). Следовательно, решаемая задача относится к многокритериальной оптимизации.

С точки зрения стратегии принятия решений существуют три основных типа задач многокритериальной оптимизации. В первом типе рассматриваются условия приоритетности одних критериев оптимальности над другими, такого типа задачи решаются лексикографическим методом. Во втором типе задач критерии оптимальности объединяются в единую функцию вида

$$F = a_1 f_1(x) + a_2 f_2(x) + \dots + a_n f_n(x) \rightarrow \max/\min,$$

где $a_1, a_2, \dots, a_n$ – весовые коэффициенты; $f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)$ – критерии оптимальности. Причем $a_1 + a_2 + \dots + a_n = 1$.

Решаются такого типа задачи методом взвешенных сумм (линейной свертки). Третий тип задач характеризуется равнозначностью критериев оптимальности, подобные задачи решаются через нахождение Парето-фронта.

Таким образом, отнести задачу многокритериальной оптимизации к первым двум типам не представляется возможным, поскольку до начала процесса оптимизации необходимо задаться некими приоритетами по отношению к критериям оптимальности. Третий тип задач применяется, когда приоритетность определить не представляется возможным, а критерии оптимальности равнозначны, это условие соответствует решаемой задаче.

В работах [25, 26] сделан обзор популяционных методов Парето-аппроксимации, которые

используют эволюционные алгоритмы (например, генетические алгоритмы (ГА), метод роя частиц) для нахождения множества оптимальных значений по Парето. Данные методы многокритериальной оптимизации, основанные на построении аппроксимации множества Парето, составляют перспективный и активно развивающийся класс подходов к решению такого рода задач, особенно с применением гибридного подхода. В работе [26] основной акцент сделан на программных продуктах и алгоритмах по оценке качества Парето-аппроксимации.

В работе [27] показано решение задачи многокритериальной параметрической оптимизации процесса фрезерования карманов из алюминиевого сплава Al 6061-T6. Показана эффективность гибридного подхода с применением регрессионного анализа и генетического алгоритма для определения оптимальных режимов обработки. Авторами работы [28] решается задача многокритериальной оптимизации, направленная на снижение энергопотребления и удельной энергии резания при фрезеровании. В основе лежит гибридная модель, сочетающая в себе применение в качестве прогностической модели искусственную нейронную сеть, обученную по методу обратного распространения ошибки, и генетический алгоритм NSGA-II. Наилучшее решение из Парето-фронта выбиралось методом идеальной точки. Авторами работы показано, что оптимизированные параметры позволяют достичь значительного снижения потребления энергии и удельных энергозатрат на резание по сравнению с расчетными режимами.

Авторами [29] рассматривается многокритериальная оптимизация с позиции определения режимов резания для чернового и чистового этапа обработки как единой взаимосвязанной системы. Критериями оптимальности в работе выбраны минимизация основного времени, энергопотребления и шероховатости поверхности. Показано, что совместная оптимизация режимов на всех этапах обработки эффективнее, чем оптимизация каждого этапа в отдельности.

Анализ результатов современных исследований позволяет сделать вывод, что наиболее перспективными являются гибридные методы многокритериальной оптимизации, которые сочетают в себе прогностические модели, используемые для математического описания целевых

функций, генетические алгоритмы для поиска Парето-фронта и методы определения оптимальной точки критериального пространства (метод идеальной точки и метод контрольных показателей). Таким образом, для достижения поставленной цели воспользуемся гибридной моделью многокритериальной оптимизации с использованием генетического алгоритма как наиболее универсального метода, подходящего под решение задач с равнозначностью критериев оптимальности. Для уменьшения количества получаемых оптимальных вариантов воспользуемся методом идеальной точки.

В ходе исследования будут решаться следующие **задачи**.

1. Разработка математических моделей, описывающих влияние технологических параметров обработки на отклонения от круглости и цилиндричности при чистовой обработке отверстий различными методами (расточивание, развертывание, фрезерование с круговой и винтовой интерполяцией).

2. Разработка многокритериальной оптимизационной модели и определение параметров генетического алгоритма для нахождения множества оптимальных значений по Парето.

3. Анализ влияния объема партии обрабатываемых отверстий на результаты оптимизации (положения Парето-фронта) и определение практических рекомендаций по выбору метода чистовой обработки отверстий в условиях многономенклатурного производства.

Методика исследований

Экспериментальные исследования выполнялись на фрезерных обрабатывающих центрах DMG MORI (Германия) с системой ЧПУ Heidenhain TNC 620: использовались трехкоординатный станок DMC 635V ecoline и пятикоординатный DMU 50 ecoline. Максимальная частота вращения шпинделя – 8000 мин^{-1} , максимальная скорость перемещения приводов – 24 м/мин .

Контроль и измерение режущего инструмента выполнялись с помощью контактного датчика с оптическим сенсором Heidenhain TT140. Для измерения диаметральных размеров и координат центров обработанных отверстий в трех сечениях применялся измерительный щуп Heidenhain

TS 640. Отклонения от круглости и цилиндричности контролировались на измерительной установке Roundcom-41C. В качестве обрабатываемого материала был выбран алюминиевый сплав Д16Т, широко используемый в авиа- и автомобилестроении благодаря своим физико-механическим свойствам. Глубина обработки для каждого из методов составила $b = 17 \text{ мм}$. Диаметр обрабатываемых отверстий выбран равным $13,5 \text{ мм}$. Такое решение направлено на сравнение эффективности самих методов обработки и обеспечение корректности детальной экономической модели себестоимости, параметры которой существенно зависят от конкретного типоразмера. Основные технологические параметры представлены в табл. 1.

Для метода фрезерования (с круговой и винтовой интерполяцией) выбор твердосплавной двузубой концевой фрезы диаметром 10 мм обусловлен стремлением к унификации инструмента в условиях многономенклатурного производства, а также необходимостью минимизации переменных факторов при сравнительном анализе стратегий. Кроме того, предварительные расчеты показали, что с учетом динамики разгона приводов использование данной фрезы позволяет исследовать полный диапазон минутных подач при различных стратегиях вплоть до максимальных значений.

Результаты и их обсуждение

Вектором, описывающим пространство решений, будут методы обработки: фрезерование с круговой интерполяцией, фрезерование с винтовой интерполяцией, растачивание, развертывание:

$$\bar{x}_k = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}, \quad (1)$$

где x_1 – фрезерование с круговой интерполяцией; x_2 – фрезерование с винтовой интерполяцией; x_3 – метод растачивания; x_4 – метод развертывания.

На первом этапе необходимо формализовать задачу оптимизации, заключающуюся в выборе оптимального метода обработки исходя из минимизации показателей отклонения формы (круглости и цилиндричности) и себестоимости обработки при достижении максимальной производительности. Таким образом, с учетом век-

Таблица 1

Table 1

Планирование экспериментальных исследований Planning of experimental studies

Метод обработки	Подача, мм/зуб; мм/об	Шаг винтовой траектории a_p , мм	Скорость резания V , м/мин	Инструментальное обеспечение
Фрезерование с круговой интерполяцией	0,03	—	220	Твердосплавная двузубая фреза диаметром 10 мм (DIN 6528) фирмы Sandik Corommand
	0,05			
	0,07			
Фрезерование с винтовой интерполяцией	0,03	0,3		
		0,7		
		1,1		
	0,05	0,3		
		0,7		
		1,1		
	0,07	0,3		
		0,7		
		1,1		
Растачивание	0,05	—	40	Расточная оправка C5-391.37A-16 070 A и твердосплавной расточ- ной резец R429U-E16-11066TC06 фирмы Sandvik Corommand
	0,075			
	0,1			
Развертывание	0,15	—	8	Развертка диаметром 13,5 мм с прямыми канавками (DIN 212) фирмы Walter
	0,3			
	0,45			

тора (1) задача оптимизации в общем виде выглядит так:

$$\min_{x \in \theta} \{f_{кр}(x_k), f_{цил}(x_k), f_{сс}(x_k)\};$$

$$\max_{x \in \theta} \{f_{пр}(x_k)\},$$

где $f_{кр}(x_k)$ и $f_{цил}(x_k)$ – целевые функции параметров отклонения от круглости и цилиндричности, мкм; $f_{пр}(x_k)$ – целевая функция производительности механообработки, отверстий в минуту (отв/мин); $f_{сс}(x_k)$ – целевая функция себестоимости обработки, руб.; θ – экспериментальное пространство.

На втором этапе необходимо определить целевые функции для каждого критерия оптимальности. Целевые функции параметров отклонения от круглости и цилиндричности определяем при помощи методов математической статистики. В соответствии с этим были проведены эксперименты, результаты которых представлены в табл. 2.

Методика статистической обработки экспериментальных данных включала в себя следующие этапы: подготовку данных, проверку на однородность дисперсий, регрессионный анализ. На этапе подготовки данных для каждого из методов обработки (фрезерование с круговой интерполяцией, растачивание, развертывание, фрезерование с винтовой интерполяцией) были рассчитаны средние арифметические значения и дисперсии параметров (отклонения от круглости и цилиндричности) по пяти повторным опытам в каждой точке плана эксперимента. Всего в исследовании по плану, представленному в табл. 2, было выполнено 90 экспериментов. Во время проверки на однородность дисперсий доверительный интервал при оценке параметров принимался для уровня значимости $p = 0,05$ (доверительная вероятность 95 %). Проверка осуществлялась с использованием G -критерия Кохрена. Экспериментальные данные проверялись внутри каждого метода обработки и для каждого контролируемого параметра.



Таблица 2

Table 2

Результаты экспериментальных исследований
Results of experimental studies

Метод обработки	Подача, мм/зуб; мм/об	Шаг винтовой траектории, мм	Среднее значение отклонения от круглости, мкм	Среднее значение отклонения от цилиндричности, мкм	Дисперсия отклонений от круглости, мкм ²	Дисперсия отклонений от цилиндричности, мкм ²
Фрезерование с круговой интерполяцией	0,03	—	22,2	34,1	4,270	4,170
	0,05		25,5	38,4	1,323	4,123
	0,07		30,5	44,9	0,503	4,163
Фрезерование с винтовой интерполяцией	0,03	0,3	6,96	15,1	0,083	0,177
		0,7	7,47	16,3	0,383	0,548
		1,1	7,98	17,5	0,373	0,423
	0,05	0,3	7,66	13,3	0,277	0,163
		0,7	7,90	15,6	0,420	0,658
		1,1	8,14	17,9	0,334	0,247
	0,07	0,3	8,53	11,4	0,115	0,277
		0,7	8,44	14,7	0,378	0,465
		1,1	8,34	18,3	0,145	0,307
Растачивание	0,05	—	5,8	9,4	0,655	1,563
	0,075		5,7	11,1	0,002	1,363
	0,1		6,3	11,5	0,861	5,743
Развертывание	0,15	—	8,87	14,2	0,49	1,083
	0,3		10,5	15,2	1,86	1,123
	0,45		9,0	17,3	0,39	1,243

тра точности (отклонений от круглости и цилиндричности). Результаты проверки однородности дисперсий представлены в табл. 3.

Таким образом, для всех проверенных групп выполняется условие $G_n < G_{кр}$, нулевые гипотезы об однородности дисперсий не отвергаются, следовательно, дисперсии измерений внутри

каждого метода и по каждому параметру являются статистически однородными, что позволяет применить метод регрессионного анализа. Для методов, где варьировался один фактор, использовался однофакторный регрессионный анализ. Для процесса фрезерования с винтовой интерполяцией, характеризующегося влиянием

Таблица 3

Table 3

Результаты проверки однородности дисперсий
Results of homogeneity of variance tests

Метод обработки	Наблюдаемое значение G_n		Критическое значение $G_{кр}$
	отклонение от круглости	отклонение от цилиндричности	
Фрезерование с круговой интерполяцией	0,7007	0,3348	0,707
Фрезерование с винтовой интерполяцией	0,1675	0,2015	0,352
Растачивание	0,5669	0,662	0,707
Развертывание	0,6788	0,360	0,707

двух факторов, был выполнен многофакторный регрессионный анализ. Общий вид регрессионной модели представляют в виде

$$f(x) = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{\substack{i=1 \\ j \neq 1}}^k b_{ij} x_i x_j + \dots + \sum_{i=1}^k b_{ij} x_i^n + \varepsilon, \quad (2)$$

где $f(x)$ – значение параметра отклика; $b_0 \dots b_{ij}$ – коэффициенты регрессии; x_i и x_j – независимые

факторы; k – число факторов; ε – ошибка регрессии.

На следующем этапе были определены коэффициенты регрессии и их доверительные интервалы, проверена статистическая значимость коэффициентов. Проведен расчет остаточной дисперсии и выполнена проверка адекватности модели по критерию Фишера (F). Таким образом, в соответствии с уравнением (2) получены следующие целевые функции для каждого метода:

$$f_{кр}(x_k) = \begin{cases} 15,65 + 209F_z & \text{при } x_1 \quad (F_H = 0,47 < F_{кр} = 4,75); \\ 5,22 + 45,125F_z + 2,29a_p - 33,75F_z a_p & \text{при } x_2 \quad (F_H = 0,1 < F_{кр} = 7,16); \\ 4,629 + 15,6F_u & \text{при } x_3 \quad (F_H = 0,1 < F_{кр} = 4,75); \\ 9,48 + 0,46F_u & \text{при } x_4 \quad (F_H = 2,5 < F_{кр} = 4,75); \end{cases}$$

$$f_{кр}(x_k) = \begin{cases} 25,59 + 271,5F_z & \text{при } x_1 \quad (F_H = 0,39 < F_{кр} = 4,75); \\ 18,1 - 131,4F_z + 1,06a_p - 136,25F_z a_p & \text{при } x_2 \quad (F_H = 0,1 < F_{кр} = 7,16); \\ 7,59 + 41,2F_u & \text{при } x_3 \quad (F_H = 0,13 < F_{кр} = 4,75); \\ 12,49 + 10,33F_u & \text{при } x_4 \quad (F_H = 0,39 < F_{кр} = 4,75). \end{cases}$$

Целевые функции производительности для каждого из методов определялись исходя из кинематики процесса обработки. При фрезеровании с круговой интерполяцией процесс включает в себя вспомогательное движение позиционирования инструмента на заданную глубину, последующее формообразующее движение и съём припуска по круговой траектории. При фрезеровании с винтовой интерполяцией заглабление инструмента и съём припуска происходит по винтовой траектории, формообразующее движение складывается за счет перемещения исполнительных органов обрабатываемого центра по трем координатным осям x , y , z одновременно. Кинематика растачивания и развертывания заключается в последовательном заглаблении инструмента по одной оси z . Следовательно, целевые функции производительности в расчете количества получаемых отверстий в минуту описываются следующими уравнениями:

$$f_{пр}(x_k) = \begin{cases} \left(\frac{\pi(D_{отв} - D_{ин})}{zF_z n} \right)^{-1} & \text{при } x_1; \\ \left(\frac{\pi(D_{отв} - D_{ин}) \frac{l_{отв}}{a_p}}{zF_z n} \right)^{-1} & \text{при } x_2; \\ \left(\frac{l_{отв}}{F_u n} \right) & \text{при } x_3 \text{ и } x_4, \end{cases}$$

где $D_{отв}$ – диаметр обрабатываемого отверстия, мм; $D_{ин}$ – диаметр инструмента, мм; $l_{отв}$ – длина обрабатываемого отверстия, мм; z – число зубьев.

Целевая функция себестоимости, учитывающая стоимость работы оборудования, затраты на электроэнергию и инструмент, с учетом количества обрабатываемых отверстий [31]:

$$f_{сc}(x_k) = t_0 E + t_0 C_{es} + \frac{t_0 E_u(x_k)}{T} + \frac{t_{пз} E}{Q},$$



где t_0 – основное время, мин; E – стоимость минуты работы обрабатывающего центра, руб/мин; C_{es} – затраты на электроэнергию, приходящиеся на минуту резания, руб/мин; T – период стойкости инструмента, мин; E_u – расходы на инструмент за период стойкости, руб.; $t_{пз}$ – подготовительно-заключительное время, мин.; Q – количество обрабатываемых отверстий, шт.

Затраты на электроэнергию (C_{es}) и расходы на инструмент (E_u):

$$E_u(x_k) = \begin{cases} C_{dn} + T_{cm}E_c & \text{при } x_1, x_2, x_4; \\ \frac{C_{dn}f_d}{m_p q_p} + \frac{C_{pn}K_{ub}}{m_p} + T_{cm}E_c & \text{при } x_3; \end{cases}$$

$$C_{es} = \frac{C_e N}{60},$$

где C_{dn} – стоимость инструмента, руб.; f_d – коэффициент, учитывающий дополнительные затраты на ремонт державки; m_p – число режущих вершин на пластине; C_{pn} – стоимость режущей пластины, руб.; K_{ub} – коэффициент случайной убыли; T_{cm} – время, затраченное на смену инструмента; q_p – количество пластин, на которое рассчитан срок службы державки; E_c – минутная тарифная ставка станочника с накладными расходами; C_e – стоимость электроэнергии, руб/кВт·ч; N – мощность резания, кВт·ч (определяется для каждого метода обработки).

С учетом положений, представленных в работе [31], и учитывая региональную специфику, приняты следующие значения: $E = 2500$ руб/ч; $E_c = 11,6$ руб/мин; $C_e = 7,35$ руб/кВт·ч; $q_p = 130$; $K_{ub} = 1,2$; $f_d = 1,3$; $m_p = 3$; $q_p = 130$; $K_{ub} = 1,2$.

На третьем этапе необходимо задаться основными ограничениями, в рамках которых будет лежать решение данной оптимизационной задачи:

$$\begin{cases} f_{\min} \leq f \leq f_{\max}; \\ a_{p \min} \leq a_p \leq a_{p \max}; \end{cases} =$$

$$= \begin{cases} 30 \frac{\text{мм}}{\text{мин}} \leq f \leq 1200 \frac{\text{мм}}{\text{мин}}; \\ 0,3 \text{ мм} \leq a_p \leq 1,1 \text{ мм}, \end{cases}$$

где f – минутная подача, мм/мин.

Первое, что является немаловажным, – это ограничения по разгону сервоприводов обрабатывающих центров ($f_{\max} = 1200$ мм/мин) для таких диаметров отверстий. Шаг спирали огра-

ничен 1,1 мм в силу уже не существенного увеличения производительности при увеличении последнего. Диапазон диаметров выбран небольшим, поскольку большой его разброс усложнит расчет себестоимости обработки.

После постановки задачи оптимизации и определения всех целевых функций с ограничениями перейдем к четвертому этапу – настройке генетического алгоритма (ГА) для поиска множества Парето. Представим методы обработки в виде особей. Каждая такая особь кодируется одной хромосомой. Гены в данном случае будут представлены основными технологическими параметрами (F_z , F_u , a_p), используемыми в регрессионных моделях, а один из генов будет отвечать за ключевую особенность метода, такую как стратегия обработки (круговая и винтовая интерполяция). Размер популяции выбираем равным 100 особям для обеспечения хорошего разнообразия. Далее следует оценка приспособленности каждой особи на основе целевых функций и ограничений, после чего ГА приступает к этапу репродукции.

Репродукция состоит из трех основных шагов: селекции, кроссовера и мутации. Селекция отвечает за отбор родительских особей. Особи с лучшими показателями имеют более высокую вероятность быть отобранными для «размножения», что направляет эволюцию в сторону улучшения решений. Кроссовер является важным генетическим оператором, поскольку он генерирует новую хромосому, объединяя генетический материал двух родительских. В рамках нашей исследовательской задачи выбран одноточечный тип кроссовера (SBX) с вероятностью скрещивания 0,9. При одноточечном кроссовере хромосомы родителей перерезаются в случайно выбранной точке, а хромосома потомка формируется из начала первой родительской хромосомы и конца второй. Завершающим этапом является мутация – оператор случайного изменения генов в хромосоме потомка. В паре с одноточечным типом кроссовера традиционно применяют оператор полиномиальной мутации (PM). Количество итераций расчета (поколений) выбрано равным 80. ГА реализован на языке программирования Python.

На пятом этапе будет выполняться генерирование при помощи ГА оптимальных по Парето решений для различного количества обрабаты-

ваемых отверстий (1, 10, 20, 30, 40, 50). Графики сходимости работы ГА для каждого критерия оптимальности представлены на рис. 1.

Ввиду большого абсолютного разброса значений себестоимости обработки (от сотен до десятков рублей в зависимости от размера партии) для наглядного отображения сходимости генетического алгоритма по данному критерию (рис. 1, в) представлены нормированные значения $(C/C_{0_{\min}}) \cdot 10^3$, где $C_{0_{\min}}$ – минимальная себестоимость в начальной популяции для соответствующего размера партии. Таким образом, из анализа представленных графиков можно заключить, что ГА достигает наилучших значений по всем критериям оптимальности: по критерию

отклонения от круглости и цилиндричности на 20-м поколении, по себестоимости – на 70-м поколении, по производительности – на 60-м. Можно также заключить, что выбранное значение поколений достаточно для решения оптимизационной задачи.

На шестом этапе воспользуемся методом идеальной точки для нахождения лучшего решения в критериальном пространстве. Определение расстояния для каждого значения Парето с анализом его близости к идеальной точке будем проводить согласно формуле [28]:

$$S_i = \sqrt{\sum_{j=0}^k \left(\frac{f_i(x_k) - f_j^{\max}}{f_j^{\max}} \right)^2} \rightarrow \min, \quad (3)$$

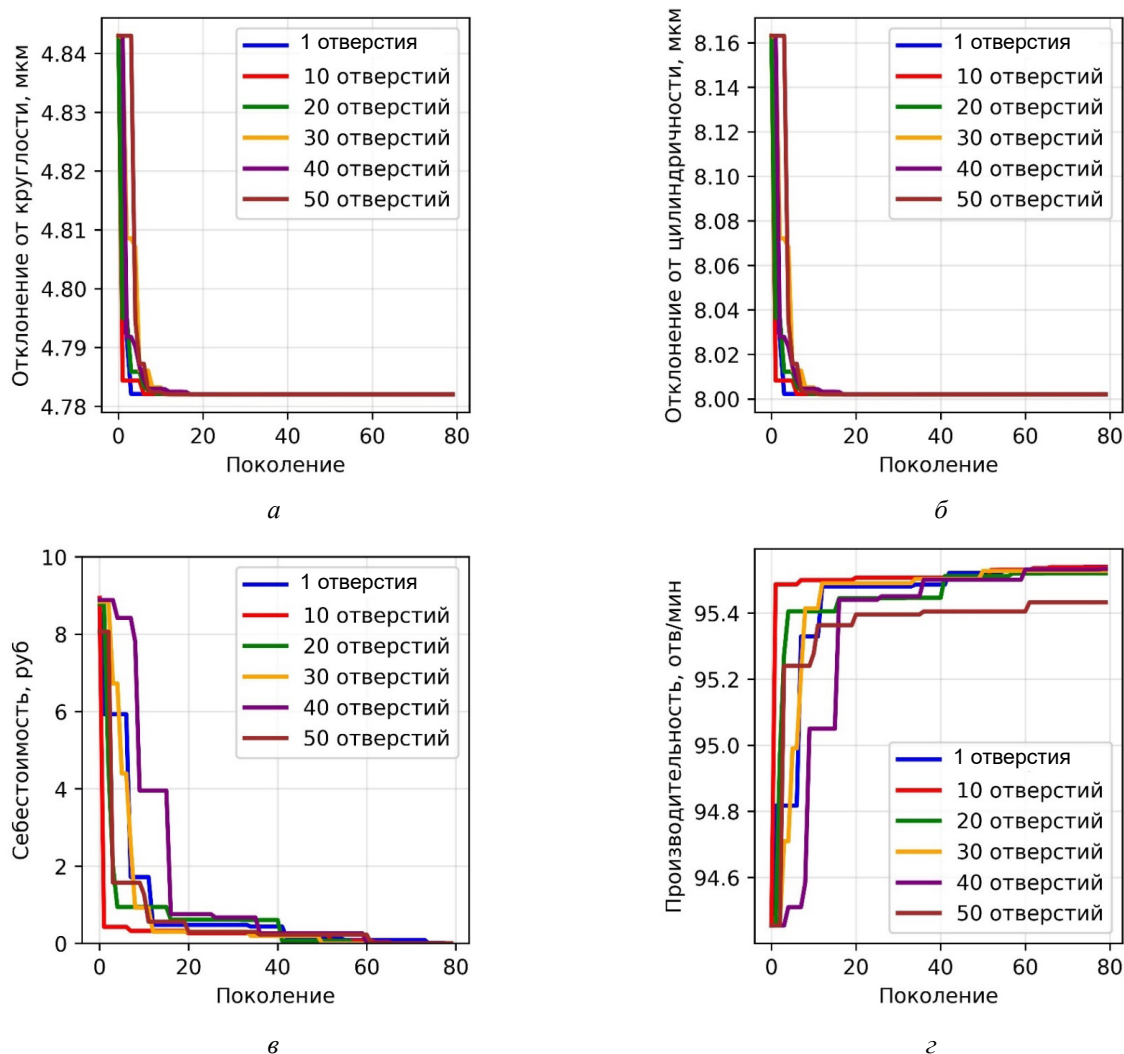


Рис. 1. Графики сходимости по критериям оптимальности:

а – отклонение от круглости; б – отклонение от цилиндричности; в – себестоимость; з – производительность

Fig. 1. Convergence plots for the optimization criteria:

а – roundness deviation; б – cylindricity deviation; в – cost; з – productivity

где S_i – глобальный критерий, который минимизирует расстояние до идеальной точки; $f_j(x_i)$ – значение j -го критерия; $f_j^{\max}$ – максимальное значение j -го критерия.

Таким образом, используя выражение (3) на множестве Парето, можно определить оптимальные методы обработки для различного количества обрабатываемых отверстий (рис. 2). Результаты моделирования также представлены в табл. 4.

Анализ графиков Парето-фронта и результатов, представленных в табл. 4, позволяет заключить, что метод фрезерования с винтовой интерполяцией является оптимальным методом при обработке высокоточных отверстий, если количество отверстий в партии лежит в диапазоне от 1 до 30 единиц. При дальнейшем уве-

личении количества отверстий оптимальным с позиции достигаемой точности и незначительного роста себестоимости методом становится растачивание.

Таким образом, решение многокритериальной оптимизационной задачи позволяет определить оптимальный метод обработки отверстий, обеспечивающий баланс между высокой точностью, производительностью и низкой себестоимостью.

Выводы

В данной работе предложен подход к выбору метода чистовой обработки высокоточных отверстий для условий многономенклатурного производства. Подход основан на решении задачи многокритериальной оптимизации с исполь-

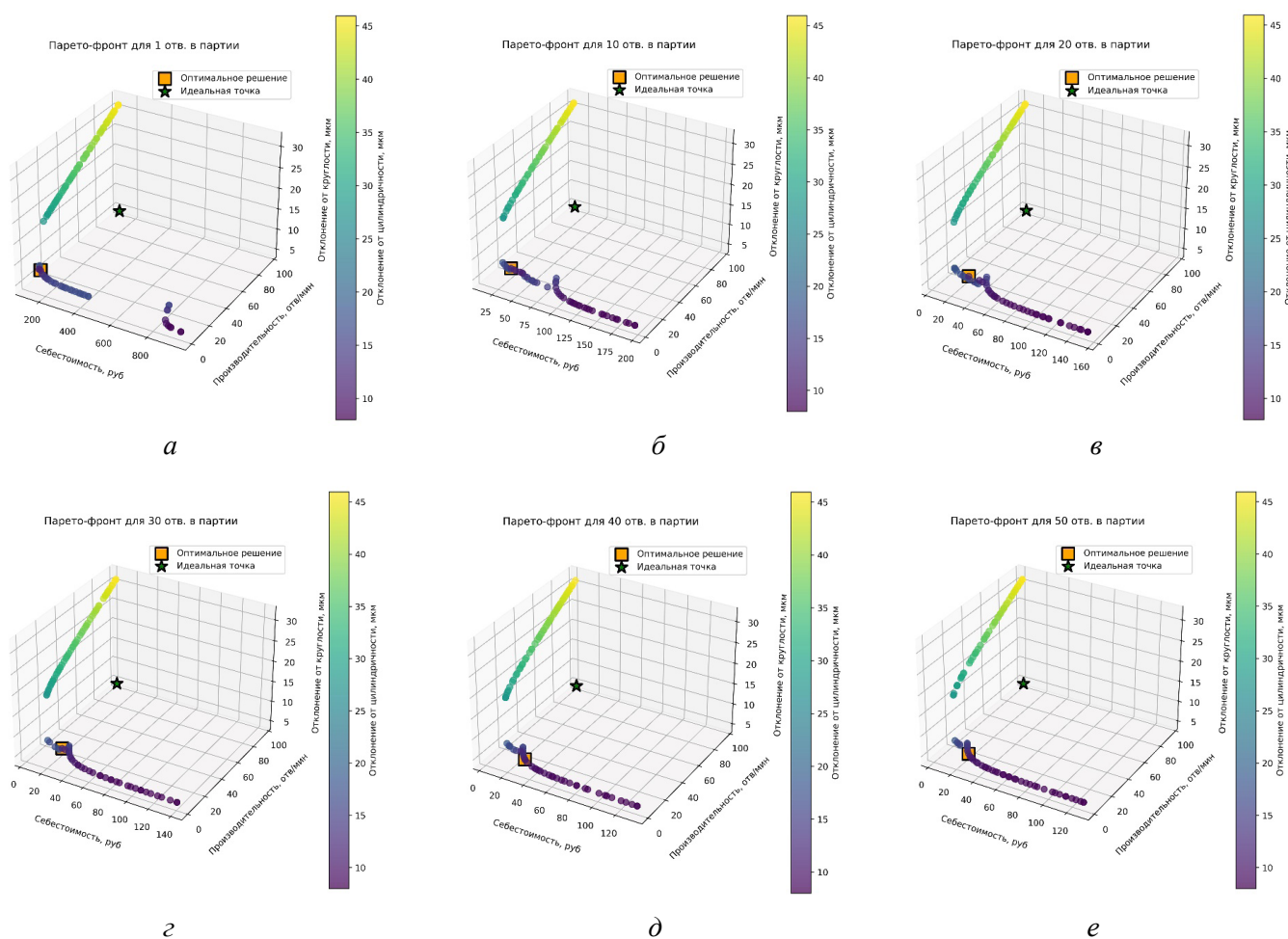


Рис. 2. Графики Парето-фронт с обозначением оптимальной и идеальной точки в критериальном пространстве для 1 отверстия в партии (а), 10 отверстий в партии (б), 20 отверстий в партии (в), 30 отверстий в партии (г), 40 отверстий в партии (д), 50 отверстий в партии (е)

Fig. 2. Pareto fronts with optimal and ideal points indicated in the criterion space for a batch containing: 1 hole (a), 10 holes (b), 20 holes (c), 30 holes (d), 40 holes (e), 50 holes (e)

Таблица 4

Table 4

Результаты моделирования

Simulation results

Количество отверстий, шт	Метод обработки	Подача, мм/зуб; мм/об	Шаг спирали, мм	Значение $f_{кр}(x_k)$, мкм	Значение $f_{цил}(x_k)$, мкм	Значение $f_{св}(x_k)$, руб.	Значение $f_{пр}(x_k)$, отв/мин
1	Фрезерование с винтовой интерполяцией	0,075	0,3	8,53	11,01	167,64	1,69
10		0,075	0,48	8,49	12,66	39,14	2,70
20		0,075	0,42	8,50	12,18	36,17	2,40
30		0,075	0,44	8,48	12,39	33,06	2,49
40	Растачивание	0,10	–	6,19	11,72	32,04	4,72
50		0,11	–	6,35	12,14	26,85	5,19

зованием методов математической статистики, генетического алгоритма и метода идеальной точки. В результате решения многокритериальной оптимизационной задачи получены следующие результаты.

1. Установлены зависимости в виде регрессионных моделей между технологическими параметрами и значениями отклонений от круглости и цилиндричности для четырех методов чистовой обработки отверстий – растачивания, развертывания, фрезерования с круговой и винтовой интерполяцией. Разработанные модели были проверены на адекватность с использованием критерия Фишера.

2. На основе анализа Парето-фронтов установлены оптимальные методы обработки в зависимости от объема партии. Установлено, что при наличии в партии высокоточных отверстий в диапазоне от 1 до 30 оптимальным методом будет являться фрезерование с винтовой интерполяцией с режимами обработки ($F_z = 0,075$ мм/зуб, $a_p = 0,3 \dots 0,5$ мм). При увеличении количества отверстий до 50 и более преимущество переходит к растачиванию с режимами ($F_u = 0,1$ мм/об, $n = 800$ об/мин), так как незначительный рост себестоимости компенсируется достижением более высоких показателей точности. Разработанный подход имеет практический потенциал для внедрения в систему технологической подготовки производства при проектировании маршрутов обработки.

3. Несмотря на результаты, в настоящее время это исследование было ограничено использованием двух обрабатывающих центров и фиксированных условий процесса резания, касающихся небольшого разброса диаметров от-

верстий, глубин отверстий и других параметров, что, несомненно, оказывает влияние на коэффициенты регрессионных моделей. Будущие исследования позволят расширить рамки для более разнообразных условий обработки и включить в задачу оптимизации дополнительные параметры, такие как шероховатость поверхности и износ инструмента.

Список литературы

1. Давыдов В.М., Кабалдин Ю.Г. Концептуальное проектирование мехатронных модулей механообработки: монография. – Владивосток: Дальнаука, 2003. – 251 с.
2. Математическое моделирование самоорганизующихся процессов в технологических системах обработки резанием / Ю.Г. Кабалдин, А.И. Олейников, А.М. Шпилев, А.А. Бурков. – Владивосток: Дальнаука, 2000. – 195 с.
3. Сергеев А.С., Плотников А.Л. Управление качеством механообработки сборным многолезвийным твердосплавным инструментом на фрезерных станках с ЧПУ // Вестник УГТУ. – 2012. – № 4 (49). – С. 138–143.
4. Сулов А.Г. Основы технологии машиностроения: учебник. – М.: КноРус, 2022. – 288 с. – ISBN 978-5-406-09241-5.
5. Безъязычный В.Ф., Сафонов С.В. Технология машиностроения: учебное пособие. – Вологда: Инфра-Инженерия, 2020. – 336 с. – ISBN 978-5-9729-0412-9.
6. Базров Б.М. Основы технологии машиностроения: учебник. – М.: Машиностроение, 2007. – 736 с. – ISBN 978-5-217-03374-4.
7. A review of helical milling process / R.B.D. Pereira, L.C. Brandão, A.P. de Paiva, J.R. Ferreira, J.P. Davim // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2017. – Vol. 120. – P. 27–48. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2017.05.002.



8. Investigation on deviation of the hole diameter in helical milling / C. Yan, R. Kang, X. Gu, Y. Bao, Z. Dong, G. Yang // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2024. – Vol. 125. – P. 604–614. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2024.07.059.
9. Brinksmeier E., Fangmann S., Meyer I. Orbital drilling kinematics // *Production Engineering*. – 2008. – Vol. 2. – P. 277–283. – DOI: 10.1007/s11740-008-0111-7.
10. Hole diameter variation and roundness in dry orbital drilling of CFRP/Ti stacks / L. Zhou, Y. Ke, H. Dong, Z. Chen, K. Gao // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2016. – Vol. 87. – P. 811–824. – DOI: 10.1007/s00170-016-8528-1.
11. Liu C., Wang G., Dargusch M.S. Modelling, simulation and experimental investigation of cutting forces during helical milling operations // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2012. – Vol. 63. – P. 839–850. – DOI: 10.1007/s00170-012-3951-4.
12. Study on the removal mechanism and milling quality of helical milling hole of SiCp/Al composites / Y. Zhou, J. Liu, S. Wang, H. Chen, D. Li, L. Ma, M. Li // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2024. – Vol. 109. – P. 379–393. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2023.12.041.
13. Ozturk O.M., Kilic Z.M., Altintas Y. Mechanics and dynamics of orbital drilling operations // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2018. – Vol. 129. – P. 37–47. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2018.03.001.
14. Modeling and analyses of helical milling process / Y. Tian, Y. Liu, F. Wang, X. Jing, D. Zhang, X. Liu // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2017. – Vol. 90. – P. 1003–1022. – DOI: 10.1007/s00170-016-9418-2.
15. Li Z., Liu Q. Surface topography and roughness in hole-making by helical milling // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2013. – Vol. 66. – P. 1415–1425. – DOI: 10.1007/s00170-012-4419-2.
16. Stelmakov V.A., Gimadееv M.R., Iakuba D.D. Research on the process of forming cylindrical surfaces of holes during milling finish with end mills using a circular interpolation strategy // *Proceedings the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020)*. Vol. 2. – Cham: Springer, 2021. – P. 917–925. – (Lecture Notes in Mechanical Engineering.). – DOI: 10.1007/978-3-030-54817-9_106.
17. A new dynamic boring force calculation method using the analytical model of time-varying toolpath and chip fracture / W. Du, L. Wang, D. Peng, Y. Shao, C.K. Mechefske // *Journal of Materials Processing Technology*. – 2022. – Vol. 306. – P. 117642. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2022.117642.
18. State-of-art, challenges, and outlook on deep hole boring: chatter suppression, tool wear monitoring, and error measurement / J. Sun, C. Sun, Z. Yan, W. Yang, C. Zhou, P. Zhang, L. Shu // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2025. – Vol. 136. – P. 2075–2105. – DOI: 10.1007/s00170-025-15007-x.
19. Du W., Wang L., Shao Y. A semi-analytical dynamics method for spindle radial throw in boring process // *Journal of Manufacturing Processes*. – 2023. – Vol. 96. – P. 110–124. – DOI: 10.1016/j.jmapro.2023.04.047.
20. Model-based error motion prediction and fit clearance optimization for machine tool spindles / H. Cao, B. Li, Y. Li, T. Kang, X. Chen // *Mechanical Systems and Signal Processing*. – 2019. – Vol. 133. – P. 106252. – DOI: 10.1016/j.ymssp.2019.106252.
21. A novel multi-probe method for separating spindle radial error from artifact roundness error / Y. Chen, X. Zhao, W. Gao, G. Hu, S. Zhang, D. Zhang // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2017. – Vol. 93. – P. 623–634. – DOI: 10.1007/s00170-017-0533-5.
22. Bhattacharyya O., Kapoor S.G., DeVor R.E. Mechanistic model for the reaming process with emphasis on process faults // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2006. – Vol. 46 (7–8). – P. 836–846. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.07.022.
23. Analysis of the surface roughness, cutting efforts, and form errors in bore reaming of hardened steel using a statistical approach / T.F.L. Melo, S.L.M.R. Filho, É.M. Arruda, L.C. Brandão // *Measurement*. – 2019. – Vol. 134. – P. 845–854. – DOI: 10.1016/j.measurement.2018.12.033.
24. The effects of process faults and misalignments on the cutting force system and hole quality in reaming / O. Bhattacharyya, M.B. Jun, S.G. Kapoor, R.E. DeVor // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2006. – Vol. 46 (12–13). – P. 1281–1290. – DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.11.002.
25. Карпенко А.П., Семенухин А.С., Митина Е.В. Популяционные методы аппроксимации множества Парето в задаче многокритериальной оптимизации. Обзор // *Машиностроение и компьютерные технологии*. – 2012. – № 4. – С. 1–36.
26. Программные системы для оценки качества Парето-аппроксимации в задаче многокритериальной оптимизации. Обзор / В.В. Белоус, С.В. Грошев, А.П. Карпенко, И.А. Шибитов // *Машиностроение и компьютерные технологии*. – 2014. – № 4. – С. 300–320.
27. A study on multi-objective optimization in non-circular helical pocket milling of Al 6061-T6 using integrated approach response surface method (RSM) with genetic algorithm (GA) / T. Khan, G. Kiswanto,

A.S. Saragih, R. Kurniawan // Results in Engineering. – 2025. – Vol. 28. – P. 107052. – DOI: 10.1016/j.rineng.2025.107052.

28. Xie Y., Mei S., Zhang C. Optimisation decision of machining process parameters considering milling energy consumption and specific cutting energy // Alexandria Engineering Journal. – 2025. – Vol. 128. – P. 786–795. – DOI: 10.1016/j.aej.2025.07.034.

29. Integrated multi-objective optimization of rough and finish cutting parameters in plane milling for sustain-

able machining considering efficiency, energy, and quality / S. Jia, S. Wang, S. Li, W. Cai, Y. Liu, S. Bai, Z.S. Li // Journal of Cleaner Production. – 2024. – Vol. 471. – P. 143406. – DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.143406.

30. Яцерицын П.И., Махаринский Е.И. Планирование эксперимента в машиностроении: справочное пособие. – Минск: Вышэйшая школа, 1985. – 286 с.

31. Грубый С.В. Оптимизация механической обработки: учебник. – СПб.: Лань, 2022. – 140 с. – ISBN 978-5-8114-3800-6.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Заявленный вклад соавторов:

В.А. Стельмаков – формулирование основной концепции исследования, планирование эксперимента, проведение экспериментов, подготовка текста статьи и формирование выводов, оформление результатов исследования в графиках, поиск аналитических материалов в отечественных и зарубежных источниках, подготовка обзора литературы;

М.Р. Гимадеев – проведение критического анализа материалов и формирование выводов, участие в обсуждении материалов статьи, анализ и дополнение текста статьи.

© 2026 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).



Obrabotka metallov -

Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov



Selection of a finishing hole processing method for multi-product manufacturing based on solving a multi-objective optimization problem

Vadim Stelmakov^{a, *}, Mikhail Gimadeev^b

Pacific National University, 136 Tihookeanskaya St., Khabarovsk, 680035, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0003-2763-1956>,  009062@togudv.ru; ^b  <https://orcid.org/0000-0001-6685-519X>,  009063@togudv.ru

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 26 November 2025

Revised: 12 December 2025

Accepted: 27 December 2025

Available online: 15 March 2026

Keywords:

Form accuracy

Optimization

Genetic algorithm

Pareto front

Finishing

Funding

This work has funded by the Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation (Project № FEME–2024–0010).

ABSTRACT

Introduction. In modern mechanical engineering, particularly in multi-product manufacturing, the development of hole machining processes remains a significant challenge. High requirements for form accuracy, hole axis alignment, and surface roughness necessitate the use of various finishing methods, such as boring and reaming. Furthermore, based on current research in hole machining, another promising method is emerging — milling employing different strategies. Each of these methods has unique advantages and limitations concerning achievable accuracy, productivity, and cost-effectiveness. In an environment of heightened competition and the need for rapid adaptation to market changes, manufacturers face the imperative to optimize their technological processes. This is especially critical for hole machining operations, which constitute a significant portion of the total manufacturing complexity of components. **Subject.** This paper investigates an approach to selecting the optimal hole finishing method — boring, reaming, or milling with circular/helical interpolation — based on solving a multi-objective optimization problem. Special emphasis is placed on analyzing the influence of the number of holes being machined on the optimization results. **The purpose of this work** is to develop an approach for selecting a hole finishing method based on achievable form accuracy, cost, and productivity, through solving a structural optimization problem adapted to the conditions of multi-product manufacturing. **Methodology.** The approach is based on the application of mathematical statistics to construct regression models, establishing the influence of machining parameters on deviations from roundness and cylindricity for each finishing method under investigation. A genetic algorithm (GA) is employed to identify the Pareto-optimal solution set, and the “ideal point” method is used to select the final option. **Results and discussion.** Solving the optimization problem revealed that for batches containing 1 to 30 high-precision holes, milling with helical interpolation is the optimal method, whereas boring becomes optimal for batches of 40 or more holes. Recommendations regarding the selection of machining parameters for each optimal method were derived. The developed approach enables a substantiated selection of the processing method during the technological preparation stage, thereby reducing process planning complexity and enhancing economic efficiency.

For citation: Stelmakov V.A., Gimadeev M.R. Selection of a finishing hole processing method for multi-product manufacturing based on solving a multi-objective optimization problem. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2026, vol. 28, no. 1, pp. 46–63. DOI: 10.17212/1994-6309-2026-28.1-46-63. (In Russian).

References

1. Davydov V.M., Kabaldin Yu.G. *Kontseptual'noe proektirovanie mekhatronnykh modulei mekhanoobrabotki* [Conceptual design of mechatronic machining modules]. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2003. 251 p.
2. Kabaldin Yu.G., Oleinikov A.I., Shpilev A.M., Burkov A.A. *Matematicheskoe modelirovanie samoorganizuyushchikhsya protsessov v tekhnologicheskikh sistemakh obrabotki rezaniem* [Mathematical modeling of self-organizing processes in technological systems of cutting processing]. Vladivostok, Dal'nauka Publ., 2000. 195 p.
3. Sergeev A.S., Plotnikov A.L. Upravlenie kachestvom mekhanoobrabotki sbornym mnogolezviynym tverdosplavnym instrumentom na frezernykh stankakh s ChPU [Machining quality management by assembled multiblade tool on the CNC milling machines]. *Vestnik UGATU*, 2012, no. 4 (49), pp. 138–143.

* Corresponding author

Stelmakov Vadim A., Ph.D. (Engineering), Associate Professor
 Pacific National University,
 136 Tihookeanskaya st.
 680035, Khabarovsk, Russian Federation
 Tel.: +7 962 221-74-60, e-mail: 009062@togudv.ru

4. Suslov A.G. *Osnovy tekhnologii mashinostroeniya* [Fundamentals of mechanical engineering technology]. Moscow, KnoRus Publ., 2022. 288 p. ISBN 978-5-406-09241-5.
5. Bez'yazychnyi V.F., Safonov S.V. *Tekhnologiya mashinostroeniya* [Technology of mechanical engineering]. Vologda, Infra-Inzheneriya Publ., 2020. 336 p. ISBN 978-5-9729-0412-9.
6. Bazrov B.M. *Osnovy tekhnologii mashinostroeniya* [Fundamentals of mechanical engineering technology]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2007. 736 p. ISBN 978-5-217-03374-4.
7. Pereira R.B.D., Brandão L.C., Paiva A.P. de, Ferreira J.R., Davim J.P. A review of helical milling process. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2017, vol. 120, pp. 27–48. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2017.05.002.
8. Yan C., Kang R., Gu X., Bao Y., Dong Z., Yang G. Investigation on deviation of the hole diameter in helical milling. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, vol. 125, pp. 604–614. DOI: 10.1016/j.jmapro.2024.07.059.
9. Brinksmeier E., Fangmann S., Meyer I. Orbital drilling kinematics. *Production Engineering*, 2008, vol. 2, pp. 277–283. DOI: 10.1007/s11740-008-0111-7.
10. Zhou L., Ke Y., Dong H., Chen Z., Gao K. Hole diameter variation and roundness in dry orbital drilling of CFRP/Ti stacks. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016, vol. 87, pp. 811–824. DOI: 10.1007/s00170-016-8528-1.
11. Liu C., Wang G., Dargusch M.S. Modelling, simulation and experimental investigation of cutting forces during helical milling operations. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2012, vol. 63, pp. 839–850. DOI: 10.1007/s00170-012-3951-4.
12. Zhou Y., Liu J., Wang S., Chen H., Li D., Ma L., Li M. Study on the removal mechanism and milling quality of helical milling hole of SiCp/Al composites. *Journal of Manufacturing Processes*, 2024, vol. 109, pp. 379–393. DOI: 10.1016/j.jmapro.2023.12.041.
13. Ozturk O.M., Kilic Z.M., Altintas Y. Mechanics and dynamics of orbital drilling operations. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2018, vol. 129, pp. 37–47. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2018.03.001.
14. Tian Y., Liu Y., Wang F., Jing X., Zhang D., Liu X. Modeling and analyses of helical milling process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, vol. 90, pp. 1003–1022. DOI: 10.1007/s00170-016-9418-2.
15. Li Z., Liu Q. Surface topography and roughness in hole-making by helical milling. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2013, vol. 66, pp. 1415–1425. DOI: 10.1007/s00170-012-4419-2.
16. Stelmakov V.A., Gimadееv M.R., Iakuba D.D. Research on the process of forming cylindrical surfaces of holes during milling finish with end mills using a circular interpolation strategy. *Proceedings of the 6th International Conference on Industrial Engineering (ICIE 2020)*. Vol. 2. Cham, Springer, 2021, pp. 917–925. DOI: 10.1007/978-3-030-54817-9_106.
17. Du W., Wang L., Peng D., Shao Y., Mechefske C.K. A new dynamic boring force calculation method using the analytical model of time-varying toolpath and chip fracture. *Journal of Materials Processing Technology*, 2022, vol. 306, p. 117642. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2022.117642.
18. Sun J., Sun C., Yan Z., Yang W., Zhou C., Zhang P., Shu L. State-of-art, challenges, and outlook on deep hole boring: chatter suppression, tool wear monitoring, and error measurement. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2025, vol. 136, pp. 2075–2105. DOI: 10.1007/s00170-025-15007-x.
19. Du W., Wang L., Shao Y. A semi-analytical dynamics method for spindle radial throw in boring process. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, vol. 96, pp. 110–124. DOI: 10.1016/j.jmapro.2023.04.047.
20. Cao H., Li B., Li Y., Kang T., Chen X. Model-based error motion prediction and fit clearance optimization for machine tool spindles. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2019, vol. 133, p. 106252. DOI: 10.1016/j.ymsp.2019.106252.
21. Chen Y., Zhao X., Gao W., Hu G., Zhang S., Zhang D. A novel multi-probe method for separating spindle radial error from artifact roundness error. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017, vol. 93, pp. 623–634. DOI: 10.1007/s00170-017-0533-5.
22. Bhattacharyya O., Kapoor S.G., DeVor R.E. Mechanistic model for the reaming process with emphasis on process faults. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006, vol. 46 (7–8), pp. 836–846. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.07.022.
23. Melo T.F.L., Filho S.L.M.R., Arruda É.M., Brandão L.C. Analysis of the surface roughness, cutting efforts, and form errors in bore reaming of hardened steel using a statistical approach. *Measurement*, 2019, vol. 134, pp. 845–854. DOI: 10.1016/j.measurement.2018.12.033.

24. Bhattacharyya O., Jun M.B., Kapoor S.G., DeVor R.E. The effects of process faults and misalignments on the cutting force system and hole quality in reaming. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2006, vol. 46 (12–13), pp. 1281–1290. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2005.11.002.
25. Karpenko A.P., Semenikhin A.S., Mitina E.V. Populyatsionnye metody approksimatsii mnozhestva Pareto v zadache mnogokriterial'noi optimizatsii. Obzor [Review: population methods of Pareto set approximation in multi-objective optimization problem]. *Mashinostroenie i komp'yuternye tekhnologii = Mechanical Engineering and Computer Science*, 2012, no. 4, pp. 1–36.
26. Belous V.V., Groshev S.V., Karpenko A.P., Shibitov I.A. Programmnye sistemy dlya otsenki kachestva Pareto-approksimatsii v zadache mnogokriterial'noi optimizatsii. Obzor [Programme systems to estimate the Pareto-approximation quality in the problem of multi-criteria optimization. A review]. *Mashinostroenie i komp'yuternye tekhnologii = Mechanical Engineering and Computer Science*, 2014, no. 4, pp. 300–320.
27. Khan T., Kiswanto G., Saragih A.S., Kurniawan R. A study on multi-objective optimization in non-circular helical pocket milling of Al 6061-T6 using integrated approach response surface method (RSM) with genetic algorithm (GA). *Results in Engineering*, 2025, vol. 28, p. 107052. DOI: 10.1016/j.rineng.2025.107052.
28. Xie Y., Mei S., Zhang C. Optimisation decision of machining process parameters considering milling energy consumption and specific cutting energy. *Alexandria Engineering Journal*, 2025, vol. 128, pp. 786–795. DOI: 10.1016/j.aej.2025.07.034.
29. Jia S., Wang S., Li S., Cai W., Liu Y., Bai S., Li Z.S. Integrated multi-objective optimization of rough and finish cutting parameters in plane milling for sustainable machining considering efficiency, energy, and quality. *Journal of Cleaner Production*, 2024, vol. 471, p. 143406. DOI: 10.1016/j.jclepro.2024.143406.
30. Yashcheritsyn P.I., Makharinskii E.I. *Planirovanie eksperimenta v mashinostroenii* [Planning an experiment in mechanical engineering]. Minsk, Vysheishaya shkola Publ., 1985. 286 p.
31. Grubiy S.V. *Optimizatsiya mekhanicheskoi obrabotki* [Optimization of mechanical processing]. St. Petersburg, Lan' Publ., 2022. 140 p. ISBN 978-5-8114-3800-6.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

Author Contributions Statement:

Stelmakov V.A. – conceptualization, experimental design, conducting experiments; writing – original draft and conclusions, data visualization (graphical representation of results), literature search and review of domestic and international sources;

Gimadeev M.R. – critical analysis and interpretation of data (contributing to conclusions), participation in manuscript discussion, reviewing and editing the manuscript text.

© 2026 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0>).