

На правах рукописи



Стельмаков Вадим Александрович

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ЧИСТОВОЙ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ КОНЦЕВЫМИ ФРЕЗАМИ
НА ОБРАБАТЫВАЮЩИХ ЦЕНТРАХ С ЧПУ
В УСЛОВИЯХ МНОГОНОМЕНКЛАТУРНОГО ПРОИЗВОДСТВА**

Специальность 05.02.07 – технология и оборудование механической
и физико-технической обработки

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Комсомольск-на-Амуре - 2018

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Тихоокеанский государственный университет» (г. Хабаровск).

Научный руководитель -

доктор технических наук, профессор
Давыдов Владимир Михайлович

Официальные оппоненты -

Сабиров Фан Сагирович
доктор технических наук, профессор
ФГБОУ ВО МГТУ «СТАНКИН»

Щелкунов Евгений Борисович
кандидат технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «КнАГУ»

Ведущая организация -

Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Дальневосточный федеральный университет»

Защита состоится «31» января 2019 г. в 10-00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.092.01 в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Комсомольский-на-Амуре государственный университет» (ФГБОУ ВО «КнАГУ») по адресу: 681013, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, д. 27, ауд. 201/ 3.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Комсомольского-на-Амуре государственного университета и на официальном сайте организации по адресу www.knastu.ru. Отзывы на автореферат в двух экземплярах, подписанные и заверенные гербовой печатью организации, просим направлять по указанному адресу на имя ученого секретаря диссертационного совета, а также на электронную почту diss.material@yandex.ru

Автореферат разослан «___» _____ 201_ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета

А. Е. Проценко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы. Современное развитие техники и технологий в области металлообработки привело к увеличению номенклатуры корпусных деталей, обработка которых осуществляется на обрабатывающих центрах с ЧПУ, в таких отраслях промышленности, как судостроение и авиастроение. Из анализируемой трудоемкости изготовления корпусных деталей на обрабатывающем центре с ЧПУ можно сделать вывод, что увеличение трудоемкости происходит в процессе обработки гладких цилиндрических отверстий, имеющих высокие требования к параметрам точности диаметрального размера, отклонениям круглости и цилиндричности, а также к точности расположения оси.

Изготовление корпусных деталей сложной конфигурации с высокоточными отверстиями на обрабатывающих центрах с ЧПУ является сложной технологической задачей. Обработка отверстий в таких деталях выполняется преимущественно в три этапа: черновая обработка (спиральные, перовые сверла), получистовая (зенкеры) и чистовая (развертки, расточные резцы). Основными представителями таких изделий являются плунжерные пары для насосов, элементы держателя шасси, штампы, пресс-формы и т. д.

Применение инструментальной оснастки фирм Sandvik Corommand, Walter, Innotech и др., позволяет получать высокие показатели по точности и качеству изготавливаемого отверстия, однако в данном случае стоимость обработки такого отверстия будет являться основным критерием проверки выбранных технологических параметров. Данное обстоятельство представляется значимым, поскольку в условиях сложившейся экономической ситуации и на основе анализа развития отраслей промышленности в Дальневосточном регионе в настоящий момент на рынке функционируют предприятия с многономенклатурным производственным процессом, в рамках которого использование узкопрофильного инструмента (развертки, расточные резцы, зенкеры) не представляется возможным, в виду его высокой стоимости, неуниверсальности и трудоемкости наладки на исполнительный размер.

В связи с вышеизложенным, представляется значимым использование многофункционального режущего инструмента – такому требованию наиболее полно отвечают технологические возможности концевых твердосплавных фрез. Цилиндрической поверхностью фрезы осуществляется обработка контурных поверхностей, уступов, выемок, карманов, цилиндрических поверхностей отверстий, а торцевой её частью осуществляется обработка плоских поверхностей, шпоночных пазов и канавок.

Современные обрабатывающие центры с ЧПУ предлагают возможность использования различных стратегий фрезерования для получения высокоточных отверстий. Такими стратегиями являются: стратегия с круговой интерполяцией и стратегия с винтовой интерполяцией. Однако, в настоящее время, отсутствуют либо устарели практические рекомендации по выбору стратегии фрезерования, режимов и условий обработки необходимых для обеспечения заданной технологическим процессом точности. Данные обстоятельства формируют ши-

рокий спектр задач для обеспечения точности диаметрального размера, формы и относительного положения оси отверстия методом фрезерования на обрабатывающих центрах с ЧПУ, что обуславливает необходимость комплексного и всестороннего изучения факторов, влияющих на точность и производительность обработки.

Перечисленные недостатки, в дополнение, вызывают необходимость разработки программно-технологического комплекса для выбора рациональных режимов резания, технологических параметров инструмента, стратегий обработки, методов прогнозирования точности формы и создания на их основе автоматизированной системы поддержки принятия технологических решений на этапе подготовки производства.

Целью диссертационной работы является повышение эффективности обработки отверстий концевым фрезерным инструментом на обрабатывающих центрах с ЧПУ путем моделирования процесса формообразования и управления режимами резания в условиях многономенклатурного производства.

Для достижения поставленной цели в диссертационной работе решаются следующие **задачи**:

1. Установить экспериментальные взаимосвязи между технологическими параметрами концевых фрез и показателями отклонений от круглости и цилиндричности отверстий при стратегиях фрезерования с круговой и винтовой интерполяцией. Определить рациональные режимы, с учетом требований к точности обработанных поверхностей.

2. Разработать алгоритмы расчёта технологических параметров концевой фрезерной обработки для определения величины погрешности формы отверстий, полученных чистовой фрезерной обработкой стратегиями с круговой и винтовой интерполяцией.

3. Разработать математическую модель упругой деформации концевой фрезерной обработки при чистовой фрезерной обработке стратегией с круговой интерполяцией с целью повышения эффективности за счет прогнозирования величины погрешности.

4. Разработать автоматизированную систему принятия технологических решений для повышения производительности процесса проектирования технологических процессов чистовой фрезерной обработки отверстий с использованием стратегий круговой и винтовой интерполяции.

Методы исследования. Исследования выполнены с использованием основных положений теории формообразования, технологии машиностроения, системного анализа, методов статистического анализа, методов моделирования, теории упругости и кластерного анализа.

Достоверность результатов. Достоверность исследования подтверждена результатами моделирования и расчетов на основе данных, полученных на современном технологическом оборудовании, а также удовлетворительной сходимостью параметров экспериментально полученных результатов и результатов моделирования.

Научная новизна:

1. Установлены взаимосвязи между параметрами, описывающими геометрические и технологические характеристики концевой фрезерного инструмента и величиной отклонений от круглости и цилиндричности процесса чистового фрезерования отверстий с использованием стратегий с круговой и винтовой интерполяции.

2. Экспериментальным путем получена регрессионная модель формирования величины погрешности формы, образующейся на этапе плавного врезания инструмента в материал детали. Полученная модель учитывает данные о геометрических и технологических параметрах концевой фрезерного инструмента при чистовой фрезерной обработке отверстий стратегией с круговой интерполяцией.

3. Разработана математическая модель процесса упругой деформации концевой фрезерного инструмента при фрезерной обработке со стратегией круговой интерполяции. Математическая модель учитывает данные о технологических параметрах процесса чистовой фрезерной обработки отверстий и позволяет определить величину упругой деформации инструмента используемой при расчете погрешности формы отверстия (отклонения от цилиндричности).

4. Экспериментально доказано, что наиболее рациональными параметрами обработки для обеспечения заданной точности и качества поверхности обрабатываемых отверстий при использовании стратегии фрезерования с винтовой интерполяцией будет являться выбор максимальной рабочей подачи и шага спирали концевой фрезы в диапазоне $a_p = 0,3 \dots 0,7$ мм.

5. Разработаны алгоритмы по расчёту технологических и геометрических параметров обработки концевым фрезерным инструментом для точных цилиндрических отверстий, алгоритм оценки точности диаметрального размера и относительного положения оси цилиндрических отверстий на всей их длине, позволяющие спрогнозировать точность формы полученных отверстий, а также определить относительное положение оси отверстия и, величину погрешности межосевого расстояния.

Практическая ценность от реализации результатов работы:

1. Разработаны рекомендации по выбору технологических и геометрических параметров концевой фрезерного инструмента, используемого для чистовой обработки отверстий с стратегиями круговой и винтовой интерполяции, позволяющие, в зависимости от требований технологического процесса к точности, качеству обработанных поверхностей и производительности процесса обработки, назначать рациональные режимы обработки.

2. Разработана автоматизированная система принятия технологических решений для фрезерной обработки отверстий с использованием методов нейросетевого моделирования, позволяющая повысить производительность процесса проектирования технологических процессов обработки гладких цилиндрических отверстий.

3. Разработана методика контроля параметра отклонения от плоскостности стола фрезерного обрабатывающего центра с ЧПУ, позволяющая проводить

технологический аудит металлообрабатывающего оборудования в автоматическом режиме.

4. Разработаны и зарегистрированы программы «Определение погрешности диаметрального размера отверстий на основе анализа сечений по его длине» и «Прогнозирование параметров отклонения от круглости и цилиндричности отверстий при чистовой фрезерной обработке стратегией с круговой интерполяцией». Получены свидетельства гос.регистрации № 2016615928 и № 2018614753.

Апробация работы. Научные и практические результаты по различным разделам диссертации докладывались и обсуждались на международной научно-практической конференции «Проблемы и достижения в инновационных материалах и технологиях машиностроения» (Комсомольск-на-Амуре, 2015 г.); на третьей международной молодежной научной конференции «Поколение будущего: Взгляд молодых ученых» (Курск, 2014 г.); с XVI – XVIII краевом конкурсе-конференции «Молодые ученые – Хабаровскому краю» (Хабаровск, 2014-2018 гг.); с XVI – XVIII конкурсе –конференции «Молодых ученых и аспирантов ТОГУ» (Хабаровск, 2014-2018 гг.), на методическом семинаре в ФГБОУ ВО «Тихоокеанский государственный университет», кафедра «Технологической информатики и информационные системы» (Хабаровск, 2017 г.), на ASRTU Sino-Russian Micro/NanoSat Student Camp (КНР, Харбин, 2018 г.).

Основные результаты экспериментальных исследований внедрены в виде методики оценки параметра «отклонения от плоскостности» стола фрезерного обрабатывающего центра с ЧПУ, и следующих программных продуктов: «Определение погрешности диаметрального размера отверстия на основе анализа сечений по его длине» и «Прогнозирование параметров отклонения от круглости и цилиндричности отверстий при чистовой обработке стратегией с круговой интерполяцией» на АО «Дальэнергомаш» г. Хабаровск, а также в учебный процесс, в частности проверки знаний студентов ФГБОУ ВО «ТОГУ» кафедры ТИИС по направлениям 15.03.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», 15.03.02 «Технологические машины и оборудование», 27.03.05 «Инноватика», 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», 15.04.02 «Технологические машины и оборудование» при изучении дисциплин: «Технология машиностроения», «Метрология, стандартизация и сертификация», «Гибкие производственные системы», «Математическое моделирование в машиностроении» и др.

О внедрении результатов диссертационной работы свидетельствуют соответствующие акты.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 18 научных работ, в том числе 3 в изданиях, рекомендуемых ВАК, 1 в издании, рецензируемом Scopus, получено два свидетельства на программу ЭВМ.

Объем работы. Диссертация состоит из введения, 5 глав, общих выводов, списка литературы и приложений. Работа изложена на 182 страницах машино-

писного текста, содержит 3 таблицы, 85 рисунков, список литературы из 109 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи работы, представлена методология и методы диссертационного исследования, апробация работы, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе проведен аналитический обзор экспериментальных и теоретических исследований процесса формообразования гладких цилиндрических отверстий, включающий в себя рассмотрение следующих вопросов: 1) анализ трудоемкости изготовления отверстий на обрабатывающих центрах с ЧПУ и технологических возможностей современных твердосплавных концевых фрез; 2) концептуальная модель построения технологического процесса обработки отверстий в условиях многономенклатурного производства; анализ существующих методов получения гладких цилиндрических отверстий с точки зрения трудоемкости наладки, надежности инструмента и стоимости обработки; 3) анализа факторов влияющих на точность геометрической формы гладких цилиндрических отверстий, с оценкой степени их влияния; 4) анализ требований к качеству формообразующих поверхностей гладких цилиндрических отверстий, наиболее полно отвечающих служебному назначению изделий.

Большой вклад в изучение вопроса в области обработки резанием и влияния технологических параметров на точность геометрической формы отверстий внесли Ю.Н. Литвак, С.П. Пестов, О.Н. Михалев, О.Ю. Казакова, Д. Уайтхауз, А.П. Хусу, В.П. Маунг, Л.Л. Медянцева, В.В. Горбачева, В.Ф. Бобров, А.Н. Табенкин, С.Б. Тарасов, С.Н. Степанов и т. д. Исследованию концевой фрезерного металлорежущего инструмента посвящены работы Ю.Г. Кабалбина, Б.Я. Мокрицкого, А.С. Сергеева, А.Л. Плотникова, Д.Л. Скуратова, А.Н. Жидяева, В.М. Опарина, С.В. Грубый, А.М. Зайцева, Г.Т. Быкова, А.А. Маликова.

Проблемами повышения эффективности обработки резанием на станках с ЧПУ занимались Ф.С. Сабиров, А.В. Савилов, В.Н. Подураев, А.Е. Пашков, С.В. Биленко, Б.Б. Пономарев, С.Л. Леонов, А.Б. Белов. Авторами А.Г. Дивина, С.В. Пономарева, Shan Lou, Xiangqian Jiang, Paul J. Scott, описаны основные методы и средства измерений и контроля отверстий по точности диаметрального размера, отклонений от круглости и цилиндричности и относительного положения оси.

При обработке гладких цилиндрических отверстий в многономенклатурном производственном процессе в виду экономической целесообразности чаще всего применяется метод фрезерования на обрабатывающих центрах с ЧПУ. При этом на сегодняшний день отсутствуют, либо устарели практические рекомендации по выбору технологических параметров режущего инструмента, режи-

мов, стратегий обработки, применение которых необходимо для обеспечения заданной технологическим процессом точности.

Все вышеизложенное указывает на необходимость разработки методов определения рациональных режимов обработки, технологических параметров режущего инструмента, стратегий обработки в целях повышения эффективности процесса чистовой обработки отверстий.

Во второй главе представлена методологическая схема выполнения диссертационной работы, сформулированы этапы планирования экспериментальных исследований, выбраны материалы, оборудование и основные параметры технологической системы, необходимые, для исследования процесса формообразования гладких цилиндрических отверстий при чистовой фрезерной обработке. Приведено аппаратурное оформление экспериментальных исследований в виде используемого технологического оборудования, измерительных приборов и аппаратуры для наблюдения и записи результатов измерения.

В процессе экспериментальных исследований изучались показатели точности диаметрального размера, геометрической формы, относительного положения оси и качества микрогеометрии поверхностей отверстий при фрезерной обработке концевым инструментом. Показатели отклонений от круглости и цилиндричности исследовались на установке Rondcom 41C. Измерения производились в масштабе 1:500, без использования цифрового компенсирующего фильтра.

Эксперименты проводились на трехкоординатном обрабатывающем центре с ЧПУ DMC 635V ecoline и на пятикоординатном обрабатывающем центре с ЧПУ DMU 50 ecoline. Обрабатывающие центры оснащены современной системой ЧПУ Heidenhain TNC 620, шпинделем, позволяющим развивать скорость вращения до 8000 мин⁻¹, мощностью 13 кВт. Точность позиционирования по осям X, Y и Z составляет 0,008 мм.

В диссертационном исследовании для решения задач обеспечения точности и качества изготавливаемой продукции проводились периодические проверки состояния оборудования согласно стандартам, ГОСТ 22267-76 и ГОСТ 26016-83. Однако существующие стандарты, по проверке технических характеристик металлорежущего оборудования не учитывают специфики станков с ЧПУ, в особенности схем приводов, специфики программирования и т.д. На основании выше изложенного была разработана методика оценки параметра «отклонения от плоскостности» стола обрабатывающего центра с ЧПУ, с использованием измерительного щупа HEIDENHAIN TS620.

Измерения проводились по схеме, приведенной на рис. 1, а. После проведения замеров, полученные данные обрабатываются и строятся топографию 3D-рельефа поверхности стола (рис 1, б), из анализа которой было установлено, что исследуемый параметр не выходит за пределы паспортных значений, установленных производителем оборудования.

Разработанный метод оценки параметра отклонения от плоскостности стола обрабатывающего центра с ЧПУ, наиболее удобен в современных условиях производства, так как не занимает много времени (до 20 мин. у оператора ЧПУ)

благодаря измерительным циклам системы ЧПУ и современного математического аппарата, а также позволяет своевременно снизить вероятность появления брака в процессе производства.

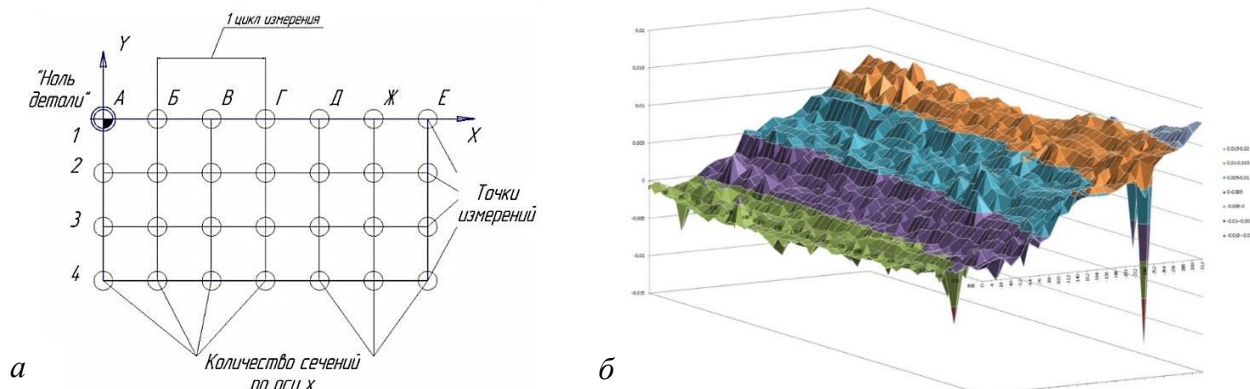


Рис. 1. Методика оценки параметра «отклонения от плоскостности» стола обрабатывающего центра с ЧПУ:

а – схема измерительной сетки; б – топография 3D-рельефа поверхности стола

Третья глава посвящена математическому моделированию точности обработки отверстий концевым фрезерным инструментом на обрабатывающих центрах с ЧПУ. Для оценки метода изготовления отверстия необходимо рассматривать весь комплекс параметров точности отверстия: точности диаметрального размера, формы, расположения осей отверстий и шероховатости.

Для оценки точности диаметрального размера и относительного положения оси отверстия был разработан алгоритм (рис. 2). Данный алгоритм позволяет наиболее точно определить относительное положение осей отверстий, за счет оценки точности диаметрального размера не в отдельно выбранном для измерения сечении, а по всей длине отверстия. Также описанный алгоритм, определения точности отверстия на всей его длине можно использовать, на современном станочном оборудовании с ЧПУ используя измерительный шуп, оператору производящему обработку отверстий различными методами (сверление, развертывание, расточка, фрезерование и т.д.).

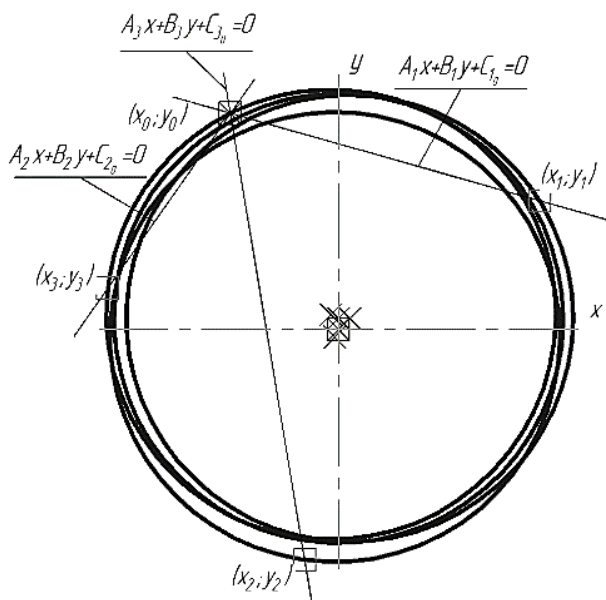


Рис. 2. Определение трех наиболее удаленных точек на круглограмме

Математическая последовательность описывается следующей системой уравнений:

$$\left\{ \begin{array}{l} A = \frac{(R_{n+1} - R_n) \cdot E_{x_{n+1}} + E_{y_{n+1}} \cdot \sqrt{E_{x_{n+1}}^2 + E_{y_{n+1}}^2 - (R_{n+1} - R_n)^2}}{E_{x_{n+1}}^2 + E_{y_{n+1}}^2} \\ B = \frac{(R_{n+1} - R_n) \cdot E_{y_{n+1}} - E_{x_{n+1}} \cdot \sqrt{E_{x_{n+1}}^2 + E_{y_{n+1}}^2 - (R_{n+1} - R_n)^2}}{E_{x_{n+1}}^2 + E_{y_{n+1}}^2} \\ C = R_{n+1} - (A \cdot E_{x_n} + B \cdot E_{y_n}) \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} A_1 x_0 + B_1 y_0 + C_1 = 0 \\ \dots \\ A_n x_0 + B_n y_0 + C_n = 0 \end{array} \right. \Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} C_{10} = \dots \\ \dots \\ C_{n0} = \dots \end{array} \right.$$

$$\Downarrow \left\{ \begin{array}{l} E_{x_n}^2 + E_{y_n}^2 = R_n^2 \\ A_1 x + B_1 y + C_{10} = 0 \end{array} \right.$$

где A_n, B_n, C_n – коэффициенты уравнения прямых, E_{xn} и E_{yn} – координаты центра измеренного n -го сечения отверстия, R_n – измеренный радиус отверстия в n -м сечении.

Предварительные эксперименты показали, что при чистовой фрезерной обработке стратегией с круговой интерполяцией на параметры отклонения от круглости и цилиндричности существенно оказывает влияние процесс врезания фрезы в материал заготовки, упругие отжатия фрезы и её профиль (рис. 3).

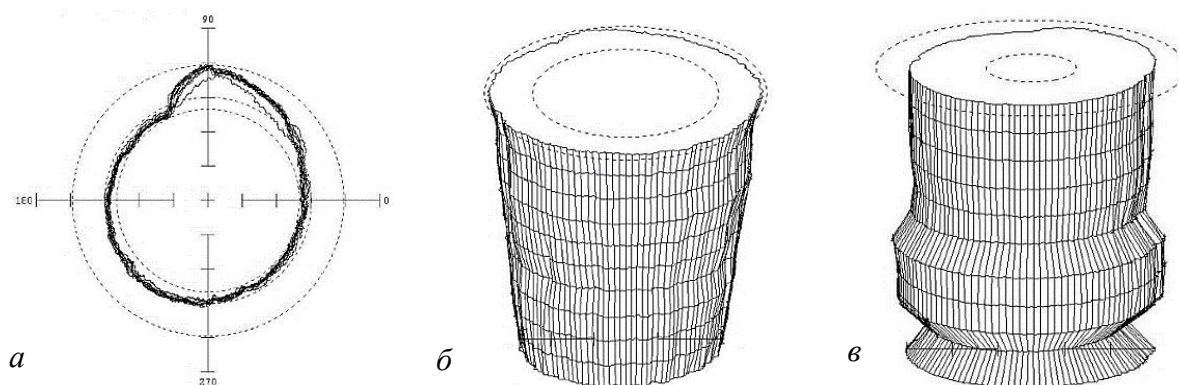


Рис. 3. Погрешность геометрической формы отверстия:

a – погрешность врезания; b – упругие отжатия фрезы; $в$ – погрешность профиля инструмента

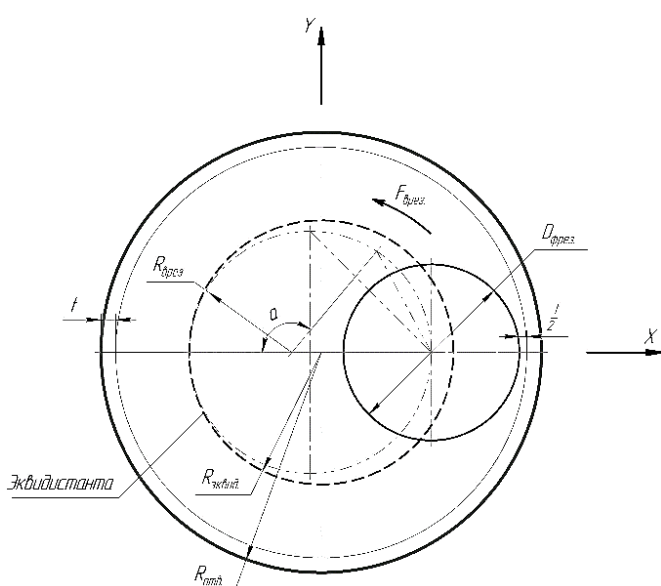


Рис. 4. Основные факторы оказывающие влияние на процесс врезания

На величину погрешности образующуюся в процессе врезания инструмента в материал оказывают влияние следующие факторы: $R_{врез}$ – радиус врезания, α – угол начальной точки радиуса захода (врезания), $F_{врез}$ – подача врезания (рис. 4).

Радиус (врезания) инструмента в материал заготовки имеет важное значение поскольку он определяет плавность процесса врезания, уменьшая при этом возможность возникновения удара, вибраций и мгновенной нагрузки на привода обрабатывающего центра. Описанный

параметр на практике при составлении управляющей программы выбирается технологом исходя из его личного опыта, что приводит к снижению точности и качества обрабатываемого отверстия. Разработан алгоритм по определению величины радиуса захода (врезания) (рис. 5).

$$\begin{aligned} x_1 &= (R_{омв.} - \psi \cdot t - R_{фрез.}) \cdot \cos \omega \\ y_1 &= (R_{омв.} - \psi \cdot t - R_{фрез.}) \cdot \sin \omega \end{aligned}, \quad \Rightarrow \quad \frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y_2 - y_1}, \quad \Rightarrow \quad y - y_3 = -\frac{1}{k}(x - x_3),$$

$$(x_2 - x_{экв.}) \cdot (x - x_{экв.}) + (y_2 - y_{экв.}) \cdot (y - y_{экв.}) = R_{экв.}^2,$$

$$\begin{cases} A_2x + B_2y + C_2 = 0 \\ A_4x + B_4y + C_4 = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x_{врез.} \\ y_{врез.} \end{cases}, \quad \Rightarrow \quad R_{врез.} = \sqrt{(x_2 - x_{врез.})^2 + (y_2 - y_{врез.})^2},$$

где k – угловой коэффициент прямой AB ; x_3 и y_3 – координаты середины прямой AB ; $R_{экв.}$ – радиус эквидистанты; $x_{экв.}$ и $y_{экв.}$ – координаты центра окружности эквидистанты, x_1 и y_1 – координаты точки предпозиционирования, x_2 и y_2 – координаты точки старта обработки, $x_{врез.}$ и $y_{врез.}$ – координаты центра окружности врезания; ω – угол на котором находится точка предпозиционирования; ψ – коэффициент запаса, выбирается в пределах $\psi = 1,1-1,5$. Данный коэффициент необходим для безопасного предпозиционирования инструмента на заданную глубину обработки.

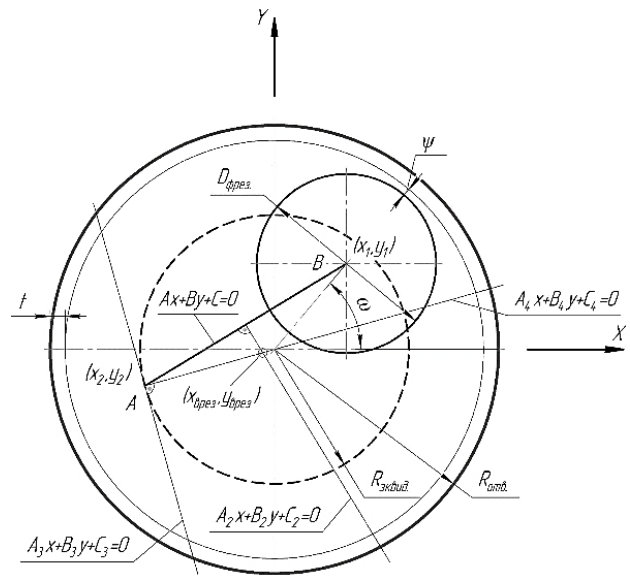


Рис. 5. Определение радиуса врезания

После определения значения параметра радиуса захода (врезания) необходимо определить угол начальной точки радиуса врезания. Данный параметр имеет следующий геометрический смысл: на окружности врезания определяется точка на заданном угле от точки старта, до которой инструмент от точки предпозиционирования следует по прямолинейной траектории и начинает по её достижению врезание по радиусу.

Выше описанное обстоятельство, означает что при неправильно выбранном значении угла, врезание наполовину будет осуществляться по линейной и круговой траектории, что влечет за собой возможность возникновения ударных нагрузок при врезании инструмента в материал заготовки и резкое снижение силы резания на этапе окончания чистовой обработки (рис. 6).

Соответственно, для обеспечения плавности процесса врезания и уменьшения вероятности возникновения вибраций в процессе чистовой обработки из-за резкого снижения силы резания, рекомендуется выбирать для экспериментальной части исследования значение угла начальной точки радиуса врезания максимально возможным.

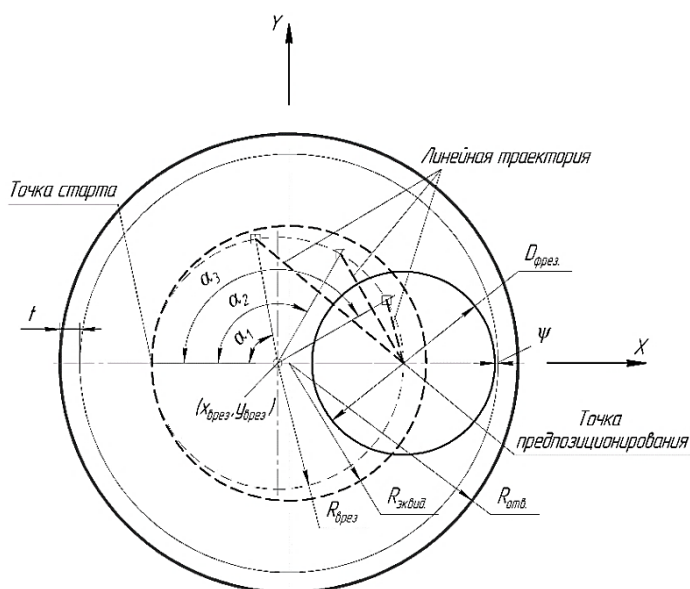


Рис. 6. Определение угла начальной точки радиуса врезания

Следующим параметром для анализа являлась подача, устанавливаемая при врезании инструмента в материал заготовки. Данный технологический параметр устанавливается на всем пути при заходе (врезании) инструмента в материал заготовки. При достижении точки старта чистовой обработки привода обрабатывающего центра разгоняются до значения рабочей подачи, что влечет за собой возрастание силы резания при осуществлении данного перехода, что может негативно сказаться на точности формы получаемого отверстия.

На этапах плавного врезания и обработки отверстия с круговой

интерполяцией появляются упругие отжатия инструмента ϵ от возникающей в процессе обработки силы резания (рис. 7), величина которой возрастает по достижению инструментом точки старта чистовой обработки, после которой значение силы резания становится «постоянным».

Рост значения силы резания связан непосредственно с ростом величины срезаемого слоя материала одним зубом фрезы. Увеличение толщины срезаемого слоя, напрямую зависит от величины выбранного радиуса захода (врезания), от выбранной величины рабочей подачи и подачи на врезание, диаметра инструмента, припуска на чистовую обработку и т.д.

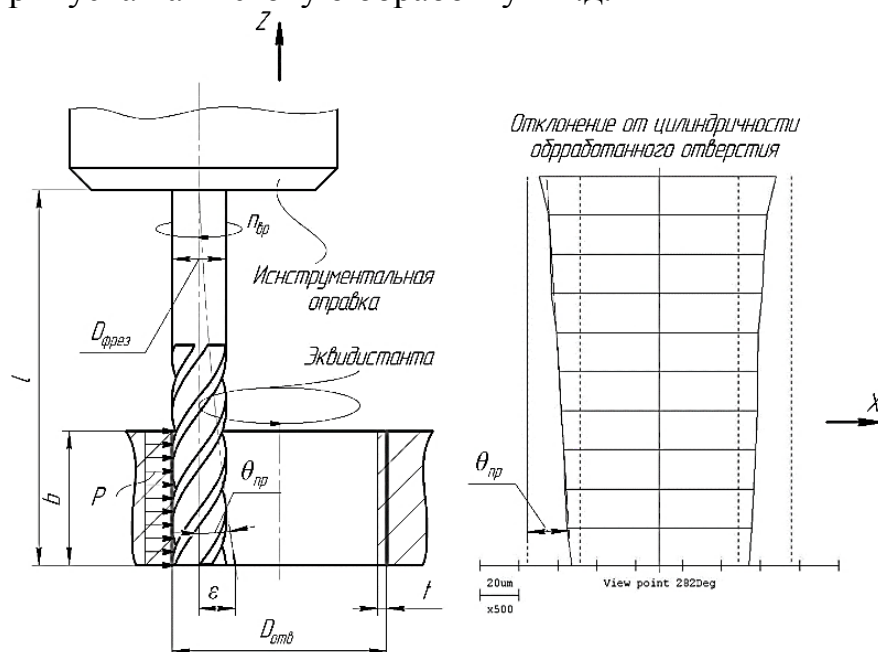


Рис. 7. Схема образования погрешности геометрической формы, связанной с упругими отжатиями инструмента

Алгоритм определения толщины срезаемого слоя материала при чистовой обработке следующий:

Определяем шаг инструмента по окружности врезания:

$$\chi = \frac{f_z \cdot 180}{\pi \cdot R_{\text{врез}}},$$

Определяем координаты положения центра фрезы относительно центра отверстия и расстояние между центром отверстия и центром фрезы:

$$\begin{cases} x_i = x_{\text{врез}} + \cos(\omega + \chi) \cdot R_{\text{эквид(врез)}} \\ y_i = y_{\text{врез}} + \sin(\omega + \chi) \cdot R_{\text{эквид(врез)}} \end{cases} \Rightarrow \varsigma = \sqrt{(x_0 - x_i)^2 + (y_0 - y_i)^2},$$

Определим координаты точки пересечения окружности фрезы и окружности заготовки:

$$\begin{cases} \alpha'^2 + \eta'^2 = R_{\text{заг}}^2 \\ (\alpha' - \varsigma)^2 + \eta'^2 = R_{\text{фрез}}^2 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \alpha' = \dots \\ \eta' = \dots \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x_j = \frac{\alpha' \cdot x_i}{\varsigma} \\ y_j = \frac{\alpha' \cdot y_i}{\varsigma} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x_{\text{пер}} = x_j - \frac{(\eta' \cdot y_i)}{\varsigma} \\ y_{\text{пер}} = y_j + \frac{(\eta' \cdot x_i)}{\varsigma} \end{cases}$$

Определим максимальную величину снимаемого слоя материала при различных угловых положениях режущего инструмента:

$$\begin{cases} (x - x_{i-1})^2 + (y - y_{i-1})^2 = R_{\text{фрез}}^2 \\ \frac{x - x_i}{x_{\text{пер}} - x_i} = \frac{y - y_i}{y_{\text{пер}} - y_i} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} x_k \\ y_k \end{cases} \Rightarrow S_{\text{max}} = \sqrt{(x_k - x_{\text{пер}})^2 + (y_k - y_{\text{пер}})^2},$$

где f_z – подача на зуб; ς – расстояние от центра отверстия до центра фрезы; α' – катет прямоугольного треугольника образованный перпендикуляром, проведенным из центра отверстия по нормали к хорде, образованной пересечением окружностей заготовки и инструмента; η' – катет прямоугольного треугольника равный половине хорды; x_j и y_j – координаты середины отрезка хорды; $x_{\text{пер}}$ и $y_{\text{пер}}$ – координаты точек пересечения окружности инструмента с окружностью заготовки; x_k и y_k – координаты точек пересечения на предыдущем угловом положении инструмента.

После определения максимальной величины снимаемого слоя материала и численного теоретического значения силы резания, определим величину погрешности от упругих отжатий инструмента представив схему на рис. 7 в виде системы переменной жесткости с одной степенью свободы:

$$\begin{cases} \frac{d^2 \varepsilon}{dz^2} = \frac{M_0(z)}{EJ_x^0(z)}; \\ M_0(z) = k(z) \cdot M(z); \end{cases} \quad \text{при} \quad \begin{cases} \varepsilon'(0) = C; \\ \varepsilon''(0) = D; \end{cases}$$

где ε – прогиб оси балки; z – координата прогиба; $M_0(z)$ – функция приведенного изгибающего момента; E – модуль упругости материала режущего инструмента; $J_x^0(z)$ – функция момента инерции хвостовика; $k(z)$ – коэффициент приведения; C – постоянная интегрирования, показывающая величину стрелы про-

гиба балки (инструмента) в начальной точке вылета инструмента; D – постоянная интегрирования, показывающая величину изгиба балки в начальной точке вылета инструмента. Данный параметр в реальности согласуется с величиной радиального биения инструмента после его установки в шпиндель станка.

Приводим данную систему к системе с постоянной жесткостью, определив при этом функцию приведенного изгибающего момента, отсюда получим:

$$\frac{d^2 \varepsilon}{dz^2} = \frac{1}{EJ_x^0} \cdot (M_A \cdot z^0 - R_A \cdot z + \Delta M \cdot (z - l_1)^0 - \Delta P \cdot (z - l_1))$$

Проинтегрировав выражение дважды, получим:

$$\varepsilon(z) = \frac{1}{EJ_z^0} \cdot \left(P \cdot \left(l - \frac{b}{2} \right) \cdot \frac{z^2}{2} - P \cdot \frac{z^3}{6} + \frac{\left(k_2 \cdot \left(l - \frac{b}{2} - l_1 \right) - k_1 \cdot \left(l - \frac{b}{2} - l_1 \right) \right) \cdot P \cdot (z - l_1)^2}{2} - \frac{(k_2 - k_1) \cdot P \cdot (z - l_1)^3}{6} \right) + D;$$

где E – модуль упругости материала режущего инструмента; J_x^0 – приведенный момент инерции; b – глубина обработки; l – длина инструмента от инструментальной оправки, l_1 – длина режущей части инструмента.

Данное уравнение позволяет вычислить величину прогиба в любом сечении режущего инструмента, тем самым определить отклонение формы. Однако необходимо понимать, что расчет отгиба должен быть оправдан в каких-то диапазонах применимости, для определения этих диапазонов построим график зависимости осевого момента инерции режущей части от диаметра инструмента (рис. 8).

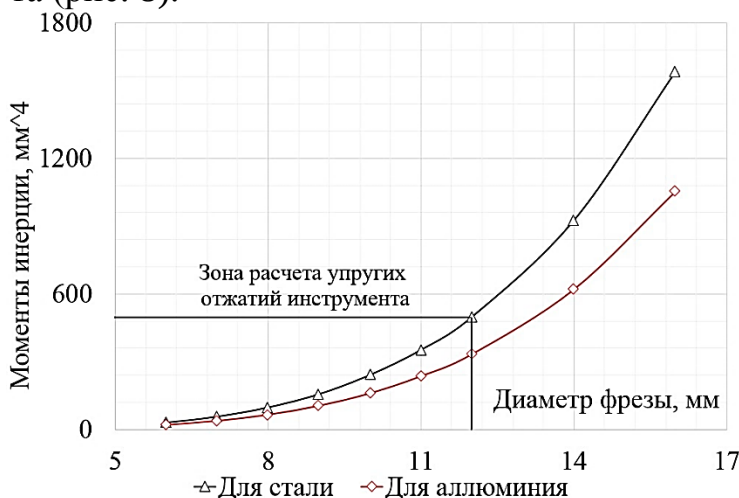


Рис. 8. Зависимость величины момента инерции режущей части от диаметра инструмента

Из анализа представленной зависимости, можно заключить, что существенная (с точки зрения обработки) величина упругих отжатый инструмента в процессе обработки будет наблюдаться в диапазоне диаметров до 12 мм включительно. Что касается погрешности, возникающей вследствие переноса формы инструмента на форму готового отверстия, то здесь диапазон факторов, влияющих на неё достаточно велик, и в силу своей

природы не зависит от технологических параметров обработки.

Предварительные эксперименты показали, что при чистовой фрезерной обработке стратегией с винтовой интерполяцией на параметры отклонения от круглости и цилиндричности существенно оказывает влияние зазор в ШВП при смене направления движения по координатным осям, данная погрешность выражается в виде пикового скачка, показанного в зоне А (рис. 9), а также, при выборе высокого значения шага между витками a_p упругие отжатия фрезы.

Погрешность, связанная с выбором большого значения шага между витками a_p , выражается в значительном росте величины силы резания и, как следствие, появлении упругих отжатий инструмента. Выбор в сторону увеличения шага между витками, оправдывается с точки зрения повышения производительности обработки, но на данном этапе нет четких рекомендаций по назначению данного параметра, и, следовательно, на практике технолог, руководствуясь личным опытом зачастую занижает режимы обработки.

В четвертой главе приводятся результаты экспериментальных исследований, целью которых является проверка адекватности описанных в третьей главе моделей и установление взаимосвязей между геометрическими и технологическими параметрами процесса чистового фрезерования отверстий для выбора рациональных режимов резания, обеспечивающих повышение точности обработки на обрабатывающих центрах с ЧПУ. Первым этапом исследований было установление зависимости погрешности диаметрального размера и относительного расположения оси отверстий от выбранного метода и стратегии обработки с использованием описанных в гл. 3 алгоритмов (рис. 10 а, б).

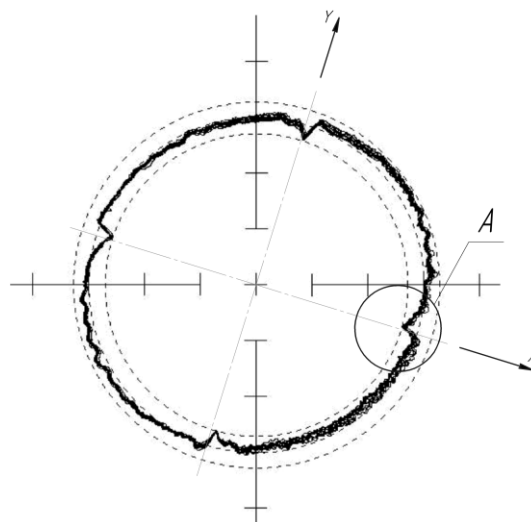


Рис. 9. Погрешность геометрической формы отверстия

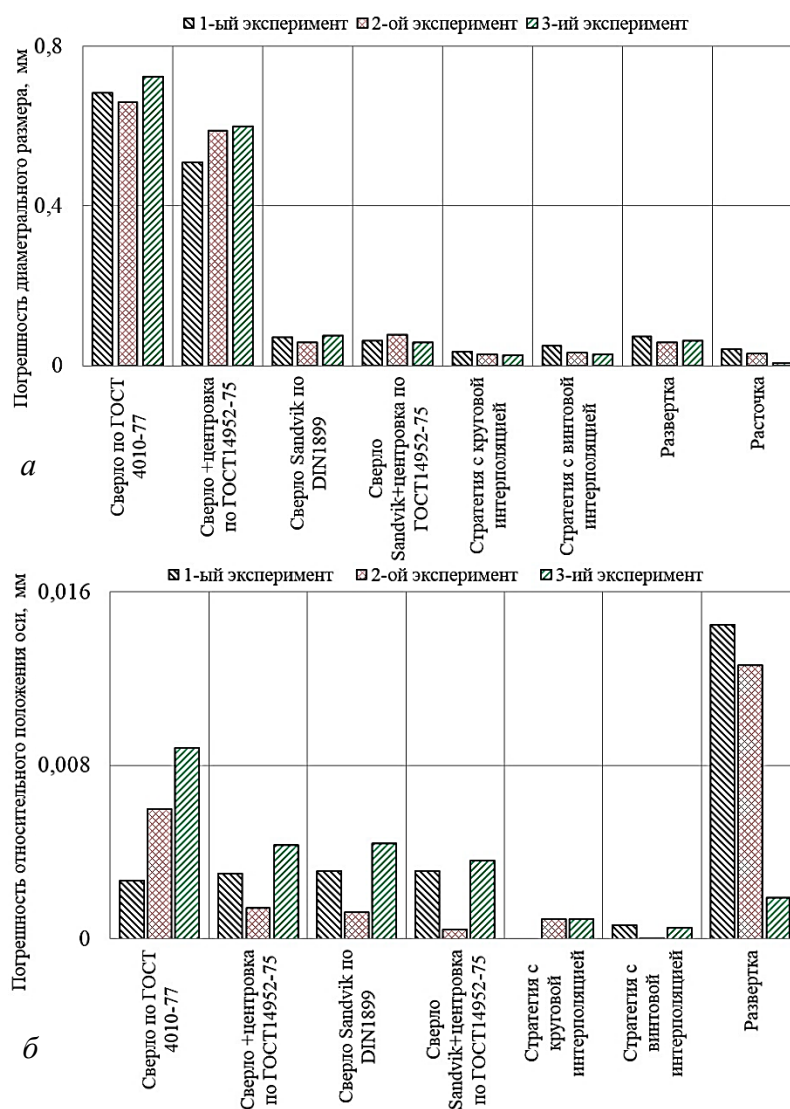


Рис. 10. Зависимость погрешности диаметрального размера (а) и относительного положения оси (б) от метода и стратегии обработки

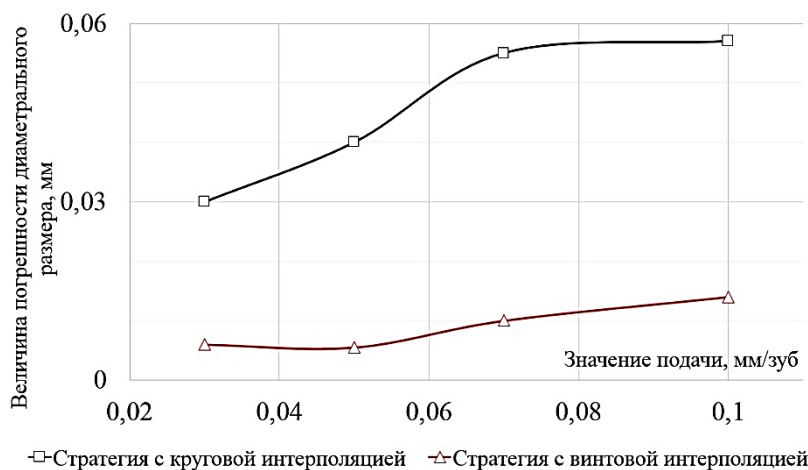


Рис. 11. Зависимость величины погрешности диаметрального размера от значения рабочей подачи

чем метод расточки и метод фрезерования с винтовой интерполяцией, полученная точность отверстия по всей длине Н8–Н9.

Что касается метода фрезерования с различными стратегиями, то здесь существенное влияние на точность диаметрального размера отверстия оказывает подача инструмента. Для стратегии фрезерования с круговой интерполяцией, потеря точности обработки происходит в пределах 40–50%, а для стратегии с винтовой интерполяцией, потеря точности происходит в пределах 15–30 % (рис. 11).

Вторым этапом было определение взаимосвязей между геометрическими параметрами и технологическими параметрами процесса чистовой фрезерной обработки стратегией с круговой интерполяцией и точностью формы отверстий. Экспериментальные зависимости величины погрешности, возникающей в процессе врезания инструмента в заготовку от величины выбранного радиуса врезания, угла начальной точки радиуса врезания и подачи, устанавливаемой при врезании в процентах от его максимального значения, – рис. 12.

Для определения оптимального диапазона значений для трех вышеописанных переменных, влияющих на отклонение от круглости при фрезеровании, проведен многофакторный регрессионный анализ, результатом которого стала регрессионная модель, позволяющая определить значение погрешности врезания в зависимости от выбранных значений трех переменных а также график поверхности (рис. 13, з) :

$$\Delta_{врез} = 21,04 - 3,32 \cdot R_{врез} - 3,94 \cdot \alpha_{врез} - 7,68 \cdot F_{врез} - 0,07 \cdot R_{врез} \cdot \alpha_{врез} + 0,17 \cdot R_{врез} \cdot F_{врез} + 1,72 \cdot \alpha_{врез} \cdot F_{врез} - 0,57 \cdot R_{врез} \cdot \alpha_{врез} \cdot F_{врез};$$

Зависимости величины упругих отжатий инструмента от рабочей подачи для стали 20 и для алюминиевого сплава марки АМг6 приведены на рис. 13. Проанализировав данные, можно заключить, что экспериментальные значения максимального отгиба инструмента отличаются от расчетных не более чем на 15 %. Данный процент несоответствия объясняется невозможностью получения экспериментальных значений силы резания при данной рабочей подаче, а также влиянием на процесс формообразования других факторов, таких как шерохова-

Из анализа представленных зависимостей видно, что наиболее эффективным и точным является метод фрезерования с винтовой интерполяцией и метод расточки, в ходе обработки фрезерованием получена точность отверстия по всей длине Н7–Н8. Метод фрезерования с круговой интерполяцией по точности диаметрального размера, хуже,

тость режущей кромки инструмента, влияние вибраций инструмента в процессе работы и др.

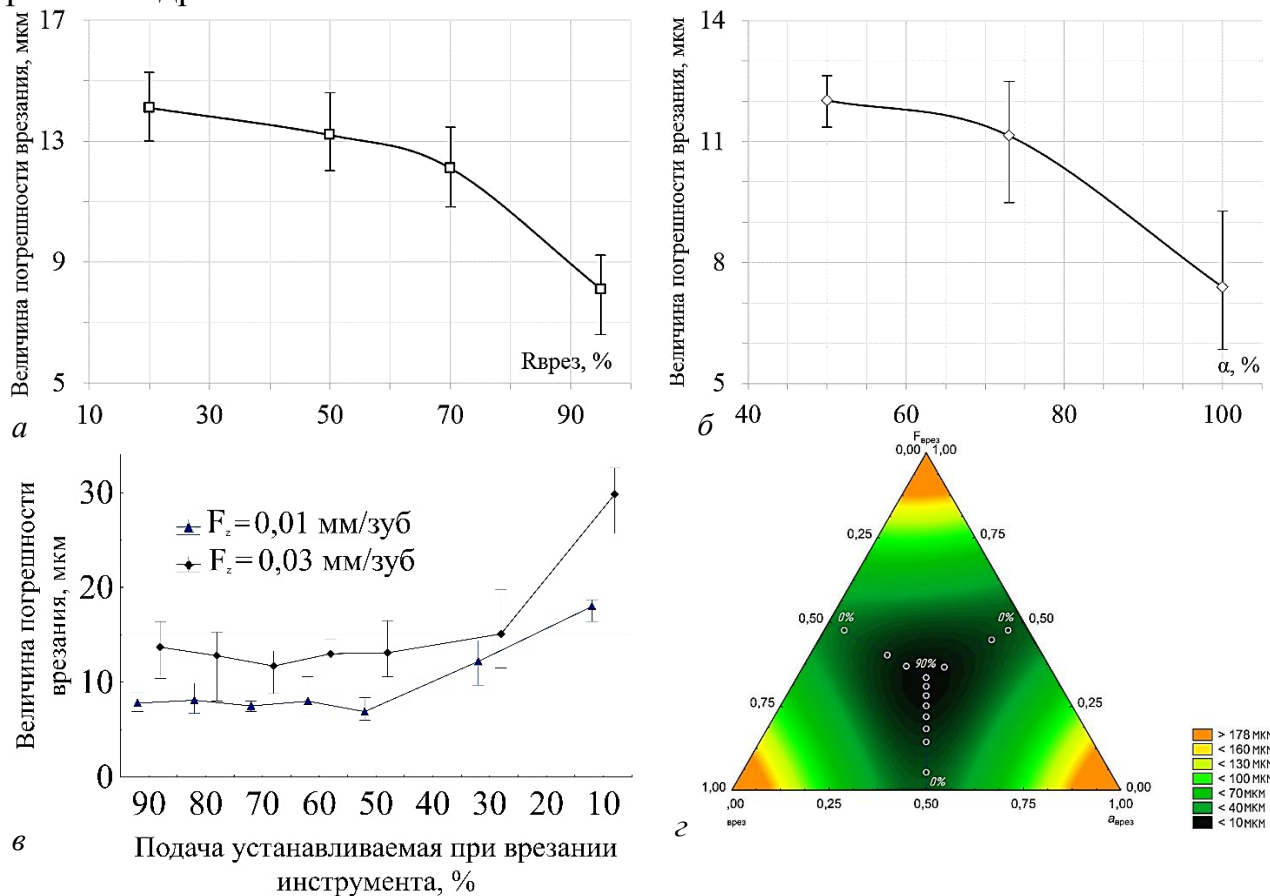


Рис. 12. Графики зависимости основных факторов, влияющих на величину погрешности врезания: а – от величины радиуса врезания; б – от величины угла начальной точки радиуса врезания; в – от величины подачи при врезании; г – график поверхности

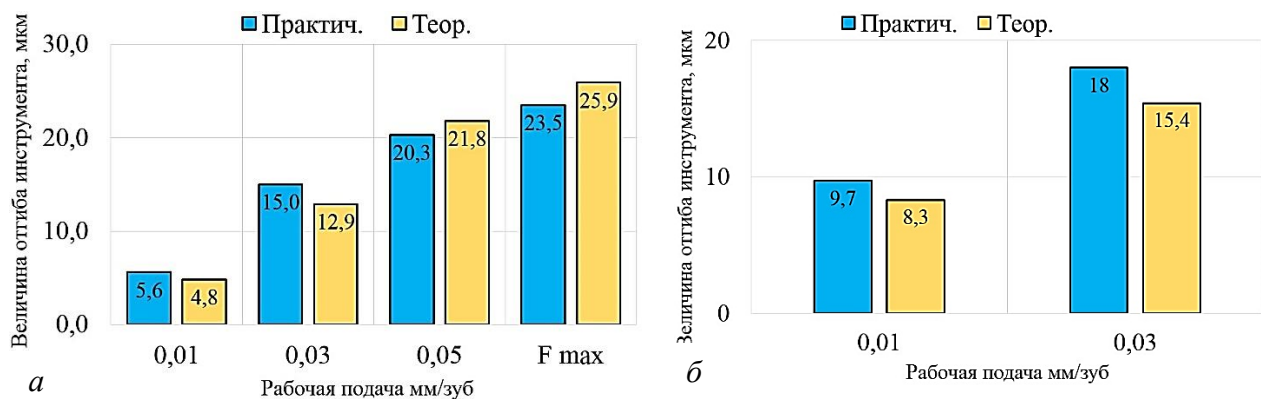


Рис. 13. Зависимость упругих отжатов от рабочей подачи: а–сталь 20; б–АМг6

Третьим этапом являлось определение взаимосвязей между геометрическими и технологическими параметрами процесса чистовой фрезерной обработки стратегией с винтовой интерполяцией и точностью формы отверстий. Для оценки параметров точности формы, был произведен ряд экспериментов в ходе которых устанавливалось влияние шага спирали, рабочей подачи и различного диаметрального размера инструмента на отклонения от круглости и цилиндричности изготавливаемых отверстий (рис. 14).

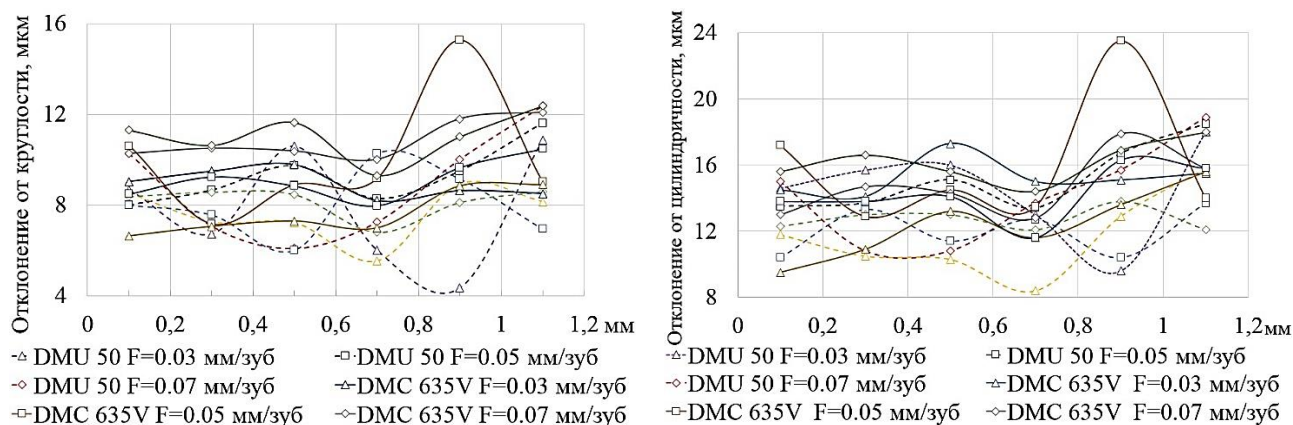


Рис. 14. Зависимости отклонений от круглости и цилиндричности от шага спирали, при постоянном диаметре инструмента 8 и 10 мм и разных рабочих подачах

Из анализа графиков видно, что величина параметра отклонения от круглости при обработке с различным значением шага спирали a_p , рабочей подачи, типа используемого оборудования и режущего инструмента лежит в диапазоне 6–12 мкм, а величина параметра отклонения от цилиндричности в диапазоне 10–18 мкм. Таким образом можно заключить, что на параметр отклонения от круглости и цилиндричности, исходя из характера полученных зависимостей, вышеописанные факторы оказывают слабое влияние.

Для определения влияния шага спирали на микрорельеф обрабатываемых поверхностей отверстий проведены эксперименты, результаты которых представлены на рис. 15. Как видно из графиков экспериментальные значения высотных параметров шероховатости зависят от выбранного значения шага спирали, при этом увеличение последнего ведет к росту значений параметров шероховатости в 1,5 – 2 раза.

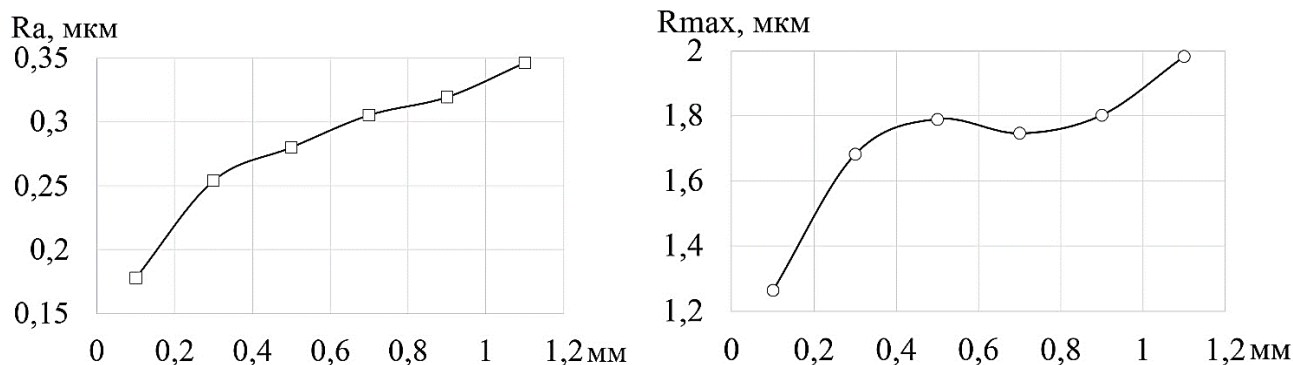


Рис. 15. Зависимости параметров шероховатости R_a и R_{max} от величины шага спирали

На основании проведенных выше экспериментальных исследований можно заключить, что на показатель отклонения от круглости и цилиндричности при стратегии с круговой интерполяцией существенно оказывают влияние такие геометрические и технологические параметры как радиус врезания, угол начальной точки радиуса врезания, подача устанавливаемая при врезании инструмента в материал заготовки и упругие деформации режущего инструмента. Однако показатели отклонения от круглости и цилиндричности при стратегии с винтовой интерполяцией вне зависимости от значения шага спирали a_p , рабочей

подачи, типа используемого оборудования и режущего инструмента лежат в диапазоне 6–12 мкм, а величина параметра отклонения от цилиндричности в диапазоне 10–18 мкм. Также для данной стратегии установлено, что рост производительности, процесса чистовой обработки отверстий при выборе шага спирали в диапазоне $a_p = 0,5–1,1$ мм является незначительным, но при этом значения высотных параметров шероховатости растут в 1,5–2 раза.

Пятая глава посвящена разработке мультиагентной системы поддержки принятия технологических решений при обработке отверстий методом фрезерования (рис. 16).

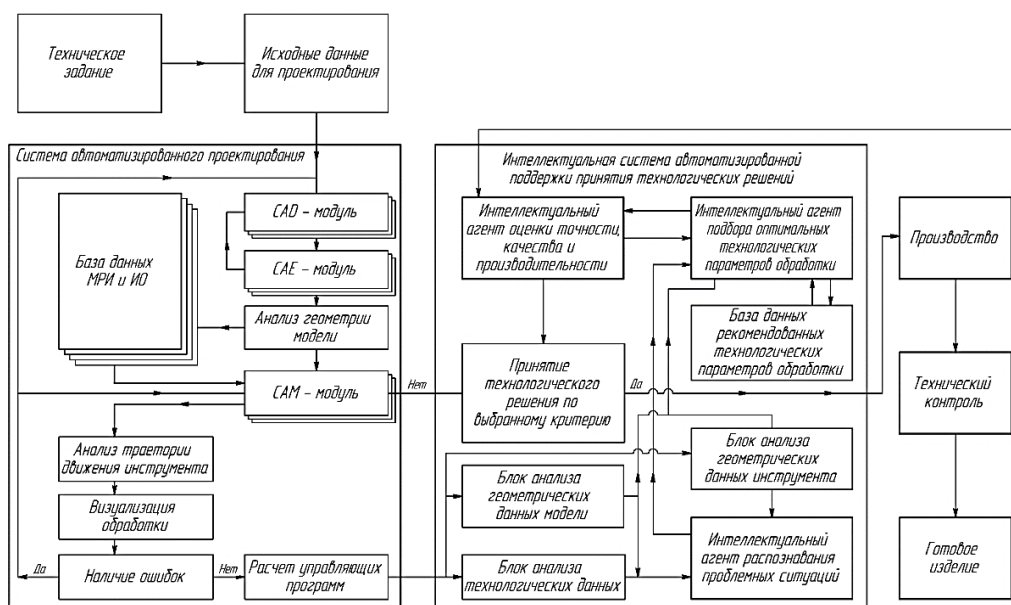


Рис. 16. Методика проектирования техпроцесса с использованием интеллектуальной системы автоматизированной поддержки принятия технологических решений

Основу мультиагентных систем составляют автономные агенты – программные агенты, способные воспринимать ситуацию, принимать решения и взаимодействовать с другими агентами. Эти интеллектуальные возможности коренным образом отличают МАС от жестко организованных программных систем, обеспечивают для МАС способность к самоорганизации. При этом отдельные автономные части программы – агенты получили возможность самостоятельно принимать решения, устанавливая соглашения о том, как будет решаться задача. Агенты приобрели свойство активности и могут вступать в различные отношения между собой, инициировать диалог с пользователем.

Модели процессов резания, используемые для функционирования интеллектуальных агентов, могут быть в виде аналитических зависимостей, нейронных сетей, имитационных моделей. Частичную реализацию функций агентов по подбору оптимальных технологических параметров и оценке качества и производительности, берут алгоритмы прогнозирования параметров отклонения от круглости и цилиндричности, которые основываются на описанных в гл. 3 математических моделях, а также на результатах экспериментальных исследований, приведённых в гл. 4. В основе алгоритмов лежит определение геометриче-

ских параметров чистовой фрезерной обработки стратегией с круговой интерполяцией, расчет величины упругих деформаций инструмента, по определенным в гл. 4 экспериментальным зависимостям и математической модели процесса, представленной в гл. 3, определение величины погрешности, связанной с врезанием инструмента в материал заготовки по регрессионной модели связывающей три основных компонента, представленной в гл. 3, также автоматизирован расчет, связанный с определением максимальной величины срезаемого слоя и численным значением теоретической силы резания.

Алгоритмы прогнозирования параметров отклонения от круглости и цилиндричности при чистовой фрезерной обработке стратегией с винтовой интерполяцией реализованы в виде нейронной модели, использующей в качестве входных параметров геометрические и технологические характеристики процесса чистовой фрезерной обработки. Нейронная сеть относится к классу сетей прямого распространения. Обучение нейронной сети производится на основе информации полученной в результате экспертных оценок по алгоритму обратного распространения ошибки.

Предложенные алгоритмы реализации интеллектуальных агентов системы поддержки принятия технологических решений позволяют рационально решать задачи повышения точности и производительности изготовления отверстий методом фрезерования с различными стратегиями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Исследованы механизмы формообразования цилиндрической поверхности отверстий концевым фрезерным инструментом, позволяющие определить основные факторы, оказывающие влияние на точность геометрической формы, получаемой фрезерованием с использованием стратегий круговой и винтовой интерполяции.

2. Установлено, что точность диаметрального размера на всей длине при чистовой обработке отверстий, методом фрезерования с использованием стратегий круговой и винтовой интерполяции, напрямую зависит от подачи, при увеличении её значения наблюдается рост значения погрешности, особенно это заметно для стратегии фрезерования с круговой интерполяцией, потеря точности обработки происходит в пределах 40–50 %. Что касается стратегии с винтовой интерполяцией, то зависимость роста погрешности диаметрального размера здесь сохраняется, но потеря точности происходит в пределах 10–30 %.

3. Определены взаимосвязи между значениями подачи на врезание, радиусом врезания и углом касательной, при обработке алюминия марки АМг6 в виде регрессионной модели, позволяющей при известных значениях, описанных переменных определить значение погрешности врезания. Модель была проверена на адекватность при помощи критерия Фишера ($F_n = 8,0 < F_{кр} = 9,28$) в доверительном интервале 0,05.

4. Установлено, что величина параметра отклонения от круглости при обработке методом фрезерования со стратегией с винтовой интерполяцией с раз-

личным значением шага спирали a_p , рабочей подачи, типа используемого оборудования и режущего инструмента лежит в диапазоне 0,006–0,012 мм, а величина параметра отклонения от цилиндричности в диапазоне 0,010–0,018 мм.

5. Экспериментально доказано, что наиболее рациональными параметрами обработки для обеспечения заданной точности и качества поверхности обрабатываемых отверстий при использовании стратегии фрезерования с винтовой интерполяцией будет являться выбор максимальной рабочей подачи и шага спирали концевой фрезы в диапазоне $a_p = 0,3–0,7$ мм.

6. Установлено, что модель процесса упругой деформации режущего инструмента при фрезерной обработке со стратегией круговой интерполяцией, рассчитанная в главе 3 может быть использована при расчете отклонения формы отверстия при обработке концевым твёрдосплавным инструментом, так как при анализе экспериментальных значений максимального отгиба инструмента с теоретическими получено, что максимальный процент несоответствия расчетных от экспериментальных составил не более чем 15 %.

7. Разработаны алгоритмы по расчету технологических и геометрических параметров концевой фрезерной обработки инструмента используемые для прогнозирования точности формы получаемых отверстий на основе экспериментально установленных зависимостей и математической модели процесса упругой деформации режущего инструмента.

8. Разработана методика проектирования технологического процесса чистовой обработки отверстий методом фрезерования с различными стратегиями на основе системы автоматизированной поддержки принятия технологических решений, основанной на принципах работы интеллектуальных агентов (программных продуктов), позволяющая сократить время на проектирование технологических процессов обработки отверстий на 20–30%.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в рецензируемых изданиях, входящих в систему SCOPUS

1. **Стельмаков, В. А.** The development of mathematical algorithms and software to evaluate the accuracy of smooth cylindrical holes/ В. А. Стельмаков, М. Р. Гимадеев, А. В. Никитенко, В. М. Давыдов // Quarterly Journal of Mechanics and Applied Mathematics. – 2016. – № 4/2 (69). – С. 606–614.

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК

2. **Стельмаков, В. А.** Метод оценки точности гладких цилиндрических отверстий по диаметральному размеру и относительному положению их осей / В. А. Стельмаков, М. Р. Гимадеев, А. В. Никитенко, В. М. Давыдов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2016. – № I–1 (25). – С. 73–81.

3. **Стельмаков, В. А.** Исследование факторов, влияющих на точность формы отверстий, полученных при чистовой фрезерной обработке / В. А. Стель-

маков, В. М. Давыдов, В. И. Шпорт // Сборка в машиностроении, приборостроении : ежемесячный научно-технический и производственный журнал. – 2018. – Т. 19, № 6 (215). – С. 256–260.

4. **Гимадеев, М. Р.** Получение заданных параметров шероховатости при сверлении и фрезеровании цилиндрических отверстий / В. А. Стельмаков, М. Р. Гимадеев, А. В. Никитенко, В. М. Давыдов // Ученые записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2016. – № I–1 (25). – С. 66–72.

Статьи и материалы конференций

5. **Стельмаков, В. А.** Обеспечение точности формы при чистовой обработке отверстий методом фрезерования / В. А. Стельмаков, А. В. Никитенко, В. М. Давыдов, М. Р. Гимадеев // Информационные технологии XXI века : сб. науч. тр. / Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та. – Хабаровск, 2017. – С. 502–509.

6. **Стельмаков, В. А.** Методика оценки точности изготавливаемых отверстий методом фрезерования по диаметральному размеру и относительному положению осей / В. А. Стельмаков // Электронное научное издание «Ученые заметки ТОГУ». – 2015. – Т. 6, № 4. – С. 613–621. – Режим доступа: http://pnu.edu.ru/media/ejournal/articles-2015/TGU_6_232.pdf

7. **Стельмаков, В. А.** Исследование влияния режимов обработки на точность формы отверстий, полученных фрезерованием / В. А. Стельмаков, М. Р. Гимадеев, А. В. Никитенко, В. М. Давыдов // Информационные технологии XXI века : сб. науч. тр. / Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та. – Хабаровск, 2015. – С. 50–55.

8. **Никитенко, А. В.** Исследование влияния точности аппроксимации траектории на производительность обработки сложнопрофильных поверхностей прессформ / В. А. Стельмаков, М. Р. Гимадеев, А. В. Никитенко, В. М. Давыдов // Проблемы и достижения в инновационных материалах и технологиях машиностроения : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Комсомольск-на Амуре, 2015. – С. 177–179.

9. **Стельмаков, В. А.** Исследование причин возникновения погрешностей формы при обработке отверстий фрезерованием / В. А. Стельмаков, М. Р. Гимадеев, А. В. Никитенко, В. М. Давыдов // Проблемы и достижения в инновационных материалах и технологиях машиностроения : материалы Междунар. науч.-техн. конф. – Комсомольск-на Амуре, 2015. – С. 257–259.

10. **Стельмаков, В. А.** Разработка методики оценки точностного параметра обрабатываемого центра с ЧПУ / В. А. Стельмаков // Молодые ученые – Хабаровскому краю : материалы XVII краевого конкурса молодых ученых и аспирантов. – Хабаровск, 2015. – С. 243–248.

11. **Стельмаков, В. А.** Моделирование процесса формообразования цилиндрических отверстий, полученных методом фрезерования на станках с ЧПУ / В. А. Стельмаков // Электронное научное издание «Ученые заметки ТОГУ». – 2017. Т. 8, № 2. – С. 321–327. Режим доступа: http://ejournal.pnu.edu.ru/media/ejournal/articles-2017/TGU_8_159.pdf

Подписано в печать 11.11.18. Формат $60 \times 84 \frac{1}{16}$. Усл. печ. л. 1,39. Тираж 100 экз. Заказ
Отдел оперативной полиграфии издательства Тихоокеанского государственного университета.
680035, Хабаровск, ул. Тихоокеанская, 136.