

На правах рукописи



Гайст Сергей Валерьевич

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ РАЗМЕРОВ, ФОРМЫ И
ШЕРОХОВАТОСТИ ПОВЕРХНОСТЕЙ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ ИЗ
СТЕКЛОПЛАСТИКА С НЕЖЕСТКИМИ СТЕНКАМИ НА
ОПЕРАЦИЯХ ФРЕЗЕРОВАНИЯ НА СТАНКАХ С ЧПУ**

Специальность 2.5.6 – Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»

Научный руководитель: **Марков Андрей Михайлович,**
доктор технических наук, профессор

Официальные оппоненты: **Макаров Владимир Федорович,** доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет», профессор кафедры «Инновационных технологий машиностроения»

Попов Андрей Юрьевич, доктор технических наук, профессор, ФГАОУ ВО «Омский государственный технический университет», профессор кафедры «Металлорежущие станки и инструменты»

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования **«Волгоградский государственный технический университет»**

Защита диссертации состоится 30 сентября 2025 г. в 15:00, на заседании диссертационного совета 24.2.437.13, созданном на базе ФГАОУ ВО «Южно-Уральский государственный университет (национальный исследовательский университет)» по адресу: г. Челябинск, проспект Ленина, 76, ауд. 1007 ГУК.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО "ЮУрГУ (НИУ)" и на сайте: <https://www.susu.ru/dissertation/24243713/gayst-sergey-valerevich/>

Автореферат разослан «___» _____ 2025 года

Ученый секретарь
диссертационного совета
д.т.н., доцент



Ардашев Д.В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования

Уровень развития конструкций машин связан с широким использованием материалов, состоящих из различных, порой неоднородных компонентов, так называемых, композитов. Наиболее распространённым композитным материалом является стеклопластики. Значительной долей во всём объеме изделий из стеклопластика являются корпусные детали (около 30%) и в том числе корпусные детали с нежесткими стенками.

Современные технологии формообразования стеклопластиков обеспечивают в большинстве случаев достижение качественных показателей поверхностей требуемых по чертежу. Однако, несмотря на это полностью исключить операции механической обработки изделий из стеклопластиков не удастся. Это связано со сложностью обеспечения формования требуемой точности фасонных отверстий, пазов, необходимостью получения точных базовых и присоединительных поверхностей (9 – 11 квалитеты точности, шероховатость от 2,5 мкм до 10 мкм). В связи с этим необходимо вводить операции механической обработки, в частности, концевое фрезерование.

При этом процесс фрезерования стеклопластика достаточно сложен из-за его особых физико-механических свойств: неоднородность в разных направлениях, плохая теплопередача, повышенная истирающая способность, упругие свойства матрицы. При фрезеровании корпусных деталей из стеклопластика с нежесткими стенками дополнительно накладываются проблемы, связанные с упругими деформации от воздействия составляющих силы резания, что обуславливает значительное снижение точности обработки. В работе, по аналогии с нежесткими цилиндрическими деталями, нежесткой стенкой принята стенка с соотношением длины к высоте больше 12 или длины к толщине больше 12.

Результаты исследований операций механической обработки композиционных материалов нашли отражение в трудах Дударева А. С., Егорова С.В., Лобанова Д.В., Макарова В. Ф., Маркова А.М., Реченко Д.С., Руднева А.В., Рычкова Д.А., Степанова А.А., Штучного Б.П., Янюшкина А.С., Ярославцева В.М., Ящерицына П.И., А.А., Becker, Chang Rao, G.V.G., S. Ratchev, S. Liu, W. Huang и многих других. Не смотря на обилие различных видов композиционных материалов и накопленный опыт по их механической обработке имеющиеся в литературе данные носят частный характер, часто противоречивы, кроме того, создаются новые виды материалов и новые способы их получения, рекомендации для обработки, которых вообще отсутствуют. Для определения оптимальных режимов обработки технологи вынуждены проводить поисковые эксперименты, связанные с установлением взаимосвязи между физико-механическими параметрами обрабатываемого композита, конструктивно-геометрических параметрами инструмента и формируемыми показателями точности детали. Эти мероприятия значительно увеличивает трудоемкость процесса технологической подготовки производства.

Отсутствие в современных системах автоматизированного проектирования операций технологических процессов (Спрут-ТМ, Вертикаль, ТехноПро, Timeline

и др.) и справочников с актуальными данными для назначения режимов резания для широкого круга композиционных материалов и невозможность учета особенностей формирования показателей точности при фрезеровании корпусных деталей с нежесткими стенками приводит к тому, что для исключения брака при обработке назначаются «заниженные» режимы, при необходимости корректируемые в процессе резания.

Развитие информационных технологий в области материаловедения и механической обработки материалов позволяет значительно сократить время и повысить качество проектирования операций. Это возможно за счет имитационного моделирования напряженно-деформированного состояния заготовки в процессе фрезерования корпусных деталей с нежесткими стенками и последующей оценки влияния входных параметров операции на формируемые значения выходных показателей качества получаемой детали. Основными программными комплексами для моделирования напряженно-деформированного состояния системы «инструмент – заготовка» в настоящее время являются Ansys, Advantage, Abaqus, Deform и др. Однако, пользователь часто сталкивается с проблемой отсутствия достоверных справочных данных не только по новым, но и по ряду известных материалов. Все это обуславливает необходимость проведения дополнительных экспериментальных исследований.

Моделированием процессов механообработки занимались Бабичев А.П., Безъязычный В.Ф., Биргер И.А., Болдырев И.С., Гузеев В.И., Кожина Т.Д., Кравченко Б.А., Подзей А.В., Промптов А.И., Силин С.С., Суслов А.Г. и др. Полученные авторами результаты справедливы для конкретных материалов, обрабатываемых в определенных условиях протекания операции. В связи с этим, приведенные в работах рекомендации и результаты в большинстве случаев невозможно применить для других видов материалов. Кроме того, при построении моделей недостаточно проработан вопрос влияния дефектов в структуре обрабатываемого материала и его анизотропии, нестабильность физико-механических свойств, которые, как правило, носят случайный характер, но оказывают существенное влияние на выходные параметры фрезерования.

Для компенсации влияния нестабильных физико-механических свойств стеклопластика, учета износа инструмента и других изменяющихся факторов в процессе обработки хорошо подходят системы адаптивного управления, которые успешно можно реализовать на станках с ЧПУ. Наиболее рациональный вариант такой системы можно разработать с помощью методов поискового конструирования. Известные работы ряда авторов Половинкина А.И., Бержа К., Дворянкина А.М., Татаркина Е.Ю. и др. в этом направлении показывают, что хорошие результаты дает комбинаторный поиск, в частности, И-ИЛИ-граф.

Таким образом, актуальным направлением исследования является разработка методики обеспечения показателей точности размеров, формы и шероховатости при фрезеровании корпусных деталей с нежесткими стенками из стеклопластика на станках с ЧПУ, совмещающей два подхода: прогнозирование с помощью моделирования для назначения производительных режимов резания, не допускающих появления дефектов на обработанной поверхности и адаптивное

управление разработанное с использованием комбинаторного поиска и компенсирующее изменяющиеся условия обработки.

Объект исследования. Операция фрезерования корпусных деталей с нежесткими стенками из стеклопластика на станках с ЧПУ.

Предмет исследования. Закономерности формирования показателей точности размеров, формы и шероховатости обработанной поверхности деталей из стеклопластика при концевом фрезеровании на станках с ЧПУ.

Цель и задачи работы

Обеспечение требуемых показателей точности размеров, формы и шероховатости поверхностей корпусных деталей из стеклопластика с нежесткими стенками путем управления процессом резания на операциях фрезерования на станках с ЧПУ.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи**:

1. Исследовать механизм образования погрешности и формирования точности размеров, формы и шероховатости поверхностей при обработке корпусных деталей из стеклопластика с нежесткими стенками на операциях фрезерования на станках с ЧПУ.

2. Установить эмпирические зависимости между составляющими силы резания, режимами резания и шероховатостью обработанной поверхности при фрезеровании корпусных деталей из стеклопластика с нежесткими стенками.

3. Построить модель прогнозирования показателей точности размера и отклонения формы при фрезеровании корпусных деталей из стеклопластика с нежесткими стенками, учитывающую взаимосвязь между напряженно-деформированным состоянием обрабатываемой заготовки, ее конструктивно-геометрическими параметрами и силой резания.

4. Разработать методику управления показателями точности размеров, формы и шероховатости обработанной поверхности на операциях фрезерования корпусных деталей с нежесткими стенками из стеклопластика на основе поискового проектирования систем адаптивного управления.

5. Внедрить результаты исследований, выполнить оценку их эффективности.

Методы и средства исследования

Теоретические исследования базировались на научных основах технологии машиностроения, теории резания, теории упругости анизотропного тела, моделирования напряженного состояния зоны резания, теории автоматического управления. Экспериментальные результаты получены с использованием аттестованного лабораторного оборудования, поверенных приборов, компьютерных программных комплексов. Полученные результаты расчетов и экспериментов проверялись в условиях реального производства.

Научная новизна

В результате проведенных исследований решена актуальная научно-производственная задача обеспечения требуемых параметров точности формы, размеров и шероховатости поверхностей корпусных деталей с нежесткими стенками из стеклопластика на операциях фрезерования на станках с ЧПУ. В

рамках исследования получены следующие результаты, составляющие научную новизну:

1. Разработана модель деформации нежесткой стенки корпусной детали из стеклопластика, представленная в виде безразмерных зависимостей и позволяющая рассчитывать упругие деформации и изменение глубины резания при фрезеровании (п. 3 паспорта специальности 2.5.6. «Технология машиностроения»);

2. Обосновано, что для компенсации погрешностей формы при фрезеровании корпусных деталей из стеклопластика с нежесткими стенками необходима система двухконтурного управления величиной упругих деформаций. Первый контур управления, учитывая изменение жесткости стенки детали в процессе обработки, обеспечивает заданную производительность. Второй контур за счет использования системы адаптивного управления устраняет влияние случайных факторов на точность и шероховатость обработанной поверхности (п. 7, п. 8 паспорта специальности 2.5.6. «Технология машиностроения»).

Практическая значимость и реализация результатов работы

Разработана и реализована методика, а на её основе алгоритм управления показателями точности и шероховатости поверхности на операции фрезерования корпусных деталей с нежесткими стенками из стеклопластика, состоящая из контура прогнозирования погрешностей, возникающих вследствие упругих деформаций заготовки под действием силы резания и контура адаптивного управления, обеспечивающего компенсацию влияния изменения жесткости заготовки при обработке, а также нестабильности физико-механических свойств обрабатываемого материала, путем изменения режимов резания, в частности, подачи.

Предложены способы адаптивного управления величиной упругих деформаций при фрезеровании корпусных деталей из стеклопластика за счет постоянной оценки силы резания, позволяющие обеспечить следующие технические требования: точность размера, точность формы (отклонение от плоскостности); шероховатость; отсутствие прижогов.

Реализация разработанной методики управления показателями точности и шероховатости на ООО "Станкоцентр Перун" (г. Барнаул) позволила обеспечить точность и снизить количество брака при изготовлении корпусных деталей с нежесткими стенками из стеклопластика в среднем на 70%. Полученный экономический эффект составляет более 159 тыс. руб.

Результаты работы нашли применение при реализации:

– методического, информационного и программного обеспечения в учебном процессе кафедры «Технология машиностроения» при реализации курсов «Компьютерное моделирование в машиностроении», «Металлорежущий инструмент» для бакалавров и магистров по направлению «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», «Методы и техника эксперимента» ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова»;

– многокомпонентного динамометра, обеспечивающего измерение составляющих сил резания в трех ортогональных плоскостях (патент №169315);

– методического и программного обеспечения для оптимизационного проектирования инструментов и параметров операций фрезерования деталей из углепластика на станках с ЧПУ (ООО "Станкоцентр Перун" г. Барнаул);

Степень достоверности и апробация работы

Основные результаты диссертации докладывались и обсуждались и получили положительную оценку на совместных научных семинарах кафедр «Технология автоматизированных производств» и «Общая технология машиностроения» АлтГТУ им. И.И. Ползунова (2014 по 2024 года), на XV- XXVI городской научно-практической конференции молодых ученых «Молодежь – Барнаулу» (Барнаул, 2014 г., 2024 г.), на I-ой Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы в машиностроении» (Новосибирск, 2014 г.), на VII Международной научно-практической конференции «Инновации в машиностроении – 2015» (Кемерово, 2019 г., 2023 г.), на XII Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Экономика региона. Промышленная политика: теория и практика разработки и реализации» (Барнаул, 2015 г.), на VIII Международной научно-технической конференции «Наукоёмкие технологии на современном этапе развития машиностроения» (Москва, 2016 г.), на Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы в машиностроении» (Новосибирск, 2016... 2024 года).

Положения, выносимые на защиту

1. Результаты теоретических и экспериментальных исследований операции фрезерования корпусных деталей с нежесткими стенками из стеклопластика, позволяющие прогнозировать геометрические показатели качества обработанных поверхностей в зависимости от режимов резания, параметров детали и изменения состояния инструмента за период его стойкости.

2. Методика управления показателями точности размеров, формы и шероховатости обработанной поверхности нежесткой стенки корпусной детали с нежесткими стенками из стеклопластика за счет использования комбинации прогнозирования упругих деформаций и адаптивного управления подачей при фрезеровании на станках с ЧПУ.

3. Алгоритм выбора режимов резания и разработки способа адаптивного управления на основе комбинаторного поиска технологических решений при фрезеровании корпусных деталей с нежесткими стенками из стеклопластика, обеспечивающий получение требуемых показателей точности размеров, формы и шероховатости обработанной поверхности.

Публикации. Основные результаты диссертационной работы изложены в 25-ти печатных работах, из которых 4 – в рецензируемых научных изданиях, входящих в перечень ВАК РФ; получены патенты РФ на полезную модель, изобретение на способ и свидетельство о регистрации программы для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы из 172 наименований и 2

приложений. Объем диссертации 175 страниц, в том числе 77 рисунков и 31 таблица.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана характеристика области проведенного исследования и обоснована актуальность диссертационной работы. Сформулирована цель и задачи исследования. Отмечены научная новизна и практическая значимость работы и её структура.

В первой главе раскрыто современное состояние проблемы обеспечения качества изготовления корпусных деталей с нежесткими стенками из композиционных материалов при лезвийной обработке, обосновано преимущество использования систем адаптивного управления. Поставлены цель и задачи исследования.

При анализе современных исследований раскрыты основные проблемы, которые возникают в процессе проектирования операций концевой фрезерования деталей из стеклопластика с нежесткими стенками. Среди них можно выделить следующие: отсутствие или противоречивость рекомендаций назначения параметров операции, что вызывает необходимость применения на производстве метода подбора режимов резания, параметров инструмента, способов управления операцией. Всё это в значительной мере ухудшает эффективность технологической подготовки и качество принимаемых решений.

Большой вклад в исследование закономерностей процесса резания и формирования качества обработанной поверхности внесли следующие учёные: Силин С. С., Безъязычный В. Ф., Суслов А. Г., Биргер И. А., Гузеев В.И., Промптов А. И., Бабичев А. П., Кожина Т. Д., Кравченко Б. А., Подзей А. В. Однако, данные работы не позволяют в полной мере учесть особенности физико-механических свойств композиционных материалов при моделировании напряженно-деформированного состояния системы «инструмент – заготовка».

Вопросы повышения эффективности обработки композиционных материалов рассматривались в работах Макарова В.Ф., Штучного Б.П. Ярославцева В.М, Маркова А.М., Янюшкина А.С., Лобанова Д.В., Рычкова Д.А. и других исследователей. При этом общий подход к поиску эффективных технологических решений до сих пор не сформулирован.

Большое количество авторов Мустафаев Г.А., Сидорчик Е.В., Соломенцев Ю.М., Митрофанов В.Г., Тимирязев В.А. и др., отмечают высокую эффективность адаптивного управления при механической обработке, обеспечивающего точность размера, формы и шероховатости при непрерывно меняющихся сложнопрогнозируемых внешних воздействиях, способного достигать оптимальных значений режимов резания для получения требуемых показателей качества обработанной поверхности, что можно применять при обработке корпусных деталей с нежесткими стенками из композиционных материалов.

Таким образом, достаточно востребованным направлением является разработка методики управления показателями точности размера и формы, а также шероховатости обработанной поверхности при фрезеровании корпусных

деталей с нежесткими стенками из стеклопластика на станках с ЧПУ, которая могла бы совместно реализовать два подхода: моделирование напряженно-деформированного состояния заготовки для назначения режимов резания, обеспечивающих необходимое качество поверхности и адаптивное управление способное компенсировать действие случайных факторов, разработанное на основе комбинаторного поиска.

Во второй главе приведена методика экспериментального исследования, основанная на методе дробного факторного эксперимента. Экспериментальные исследования позволили установить влияние режимов резания на выходные параметры процесса фрезерования стеклопластика, которые невозможно рассчитать путем моделирования. К ним относятся: сила резания – P , Н; шероховатость обработанной поверхности – R_a , мкм. Исследования проводились для острозаточенного инструмента с радиусом округления режущей кромки $R=0,05$ мм и в конце периода его стойкости – $R=0,3$ мм.

Описан состав экспериментального комплекса, включающего обрабатывающий центр модели Challenger RH-20 с системой ЧПУ, разработанный многокомпонентный динамометр (патент № RU 169315 U1 от 15.03.2017), анализатор спектра ZET 017-U8 (A17-U8), компьютер, оснащенный программным обеспечением ZETLAB, профилограф-профилометр HOMMEL TESTER W55. В качестве экспериментальных образцов для исследований выбрана заготовка из стеклопластика ВПС-30. Для фрезерования использовались концевые фрезы из твердого сплава ВК8 диаметром 10 мм с передним углом $\gamma = 5^\circ$ и задним – $\alpha = 15^\circ$.

В соответствии с методикой, получены зависимости силы резания в ортогональных осях от режимных параметров:

$$\left. \begin{aligned} P_z &= 815 \cdot V^{0,12} \cdot S_z^{0,45} \cdot t^{0,25}, \text{ при } R=0,05 \text{ мм;} \\ P_z &= 1497 \cdot V^{0,17} \cdot S_z^{0,53} \cdot t^{0,37}, \text{ при } R=0,3 \text{ мм;} \\ P_x &= 407 \cdot V^{0,12} \cdot S_z^{0,45} \cdot t^{0,25}, \text{ при } R=0,05 \text{ мм;} \\ P_x &= 748 \cdot V^{0,17} \cdot S_z^{0,53} \cdot t^{0,37}, \text{ при } R=0,3 \text{ мм;} \\ P_y &= 244,7 \cdot V^{0,12} \cdot S_z^{0,45} \cdot t^{0,25}, \text{ при } R=0,05 \text{ мм;} \\ P_y &= 449 \cdot V^{0,17} \cdot S_z^{0,53} \cdot t^{0,37}, \text{ при } R=0,3 \text{ мм.} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

На основе сопоставления значений эквивалентных напряжений и силы резания, полученных при соответствующих условиях обработки, методом наименьших квадратов была установлена их линейная зависимость. Данные зависимости в дальнейшем использовались для назначения режимов резания при проектировании операции фрезерования.

Кроме того, на основе обработки экспериментальных данных получены зависимости среднего арифметического отклонения профиля обработанной поверхности:

$$\left. \begin{aligned} R_a &= 1,11 + 0,0004 \cdot V + 40,98 \cdot S_z + 0,05 \cdot t, \text{ при } R=0,05 \text{ мм;} \\ R_a &= 1,84 + 0,0014 \cdot V + 44,46 \cdot S_z + 0,07 \cdot t, \text{ при } R=0,3 \text{ мм.} \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Установленные в ходе экспериментальных исследований взаимосвязи, отражающие влияние входных параметров (режимов резания) на выходные

параметры операции фрезерования стеклопластика (шероховатость обработанной поверхности и силы резания) позволяют прогнозировать процесс обработки на операции фрезерования.

В третьей главе изложена последовательность построения модели формирования показателей качества обработанной поверхности корпусной детали из стеклопластика с нежесткими стенками при фрезеровании. Для моделирования контактного взаимодействия заготовки и режущего инструмента и оценки упругой деформации стенки корпусной детали при концевом фрезеровании, использовалась 3D-модель (рисунок 1) детали в среде моделирования методом конечных элементов (рисунок 2), в которой учитывались физико-механические свойства материала детали и составляющая силы резания в направлении деформации стенки (P_y). Моделирование выполнялось в 5 точках приложения силы резания, равномерно расположенных по всей длине стенки.

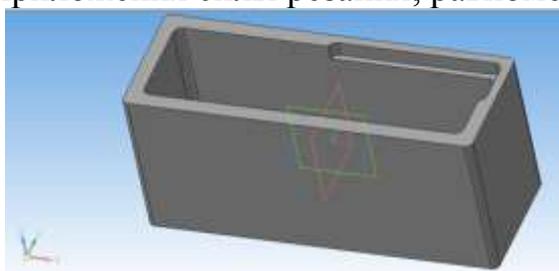


Рисунок 1 – 3D-модель корпусной детали с нежесткими стенкам

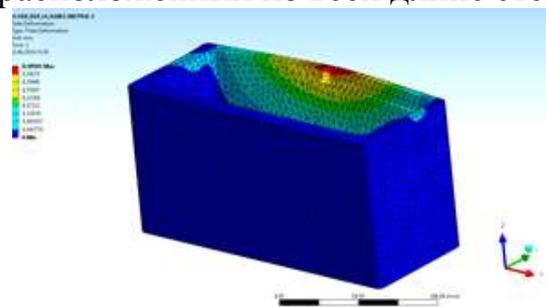


Рисунок 2 – Моделирование упругой деформации стенки под действием силы резания в точке 3 (в центре)

При оценке напряженно-деформированного состояния использовались модели детали с разной длиной ($L=150\dots230$ мм) и высотой стенки ($A=50\dots150$ мм), что позволило составить массив значений упругой деформации стенки (рисунок 3) при разных конструктивных параметрах детали и значениях режимов резания в вариантах чернового ($V=150$ м/мин; $S=0,1$ мм/зуб; $t=4$ мм, $P_y=224$ Н) и чистового ($V=180$ м/мин; $S=0,02$ мм/зуб; $t=1$ мм, $P_y=77$ Н) фрезерования.

На основе результатов моделирования напряженно-деформированного состояния детали под действием силы резания разработана расчетно-экспериментальная модель определения величины деформации $\Delta_{упр}$ корпусной детали из стеклопластика с нежесткими стенками при фрезеровании. Для исследования величины деформации стенки в зависимости от размеров детали использовано выражение зависимостей в безразмерной форме. Построение зависимостей между безразмерными параметрами позволяет расширить их диапазон применимости в отличие от эмпирических зависимостей.

Введенные безразмерные параметры: x – безразмерная координата вдоль стенки. ($x=0$ – средняя точка); D – безразмерная деформация стенки.

Для расчета безразмерной деформации используется соотношение:

$$D = \Delta / H, \quad (3)$$

где Δ – деформация стенки, мм; H – толщина стенки, мм.

Для аппроксимации $D(x)$ использовано выражение:

$$D = a_0 \cdot (x-a_1) \cdot (x-a_2) \cdot (x-a_3) \cdot (x-a_4). \quad (4)$$

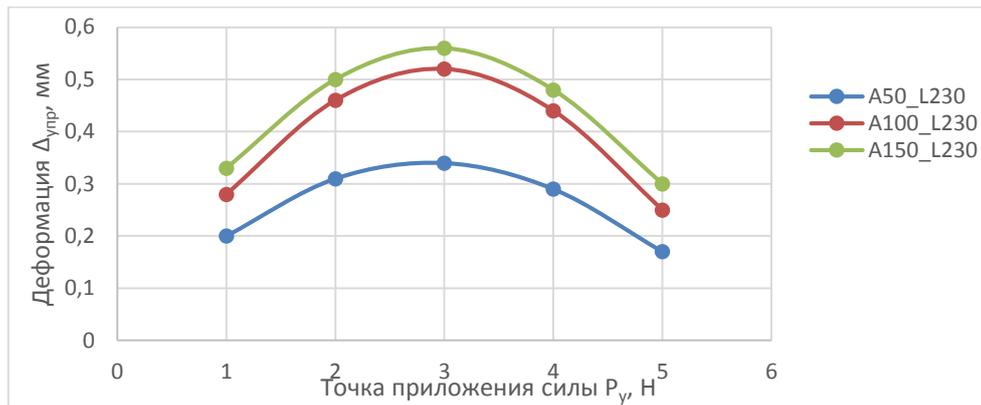
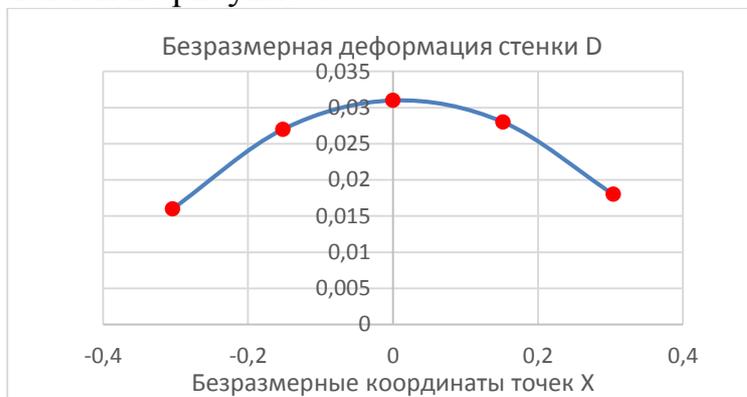


Рисунок 3 – Деформация стенки детали (Δ , мм) при черновом фрезеровании: длина детали $L=230$ мм, высота $A=50...150$ мм

Коэффициенты $a_0...a_4$ рассчитываются по методу наименьших квадратов для детали $L=230$ мм, $A=100$ мм. Результат аппроксимации зависимости 4 представлен на рисунке 4



A=100	
a_0	0,0000939
a_1	0,4380493
a_2	-0,4283874
a_3	-11,1994735
a_4	263,4994387

Рисунок 4 – Аппроксимация деформации в безразмерной форме для чернового фрезерования корпусной детали длиной $L=230$ мм и высотой $A=100$ мм

График показывает, что предложенная зависимость достаточно точно описывает данные, полученные методом конечных элементов. Аналогичные результаты получены и для других значений высоты стенки и длины стенки. Средняя погрешность аппроксимации безразмерной деформации стенки корпусной детали для всех значений A и L составляет 4,24%.

Разработанная расчетно-экспериментальная модель фрезерования корпусных деталей с нежесткими стенками из стеклопластика, на основе рассчитанной величины деформации, позволяет прогнозировать показатели точности детали на операции фрезерования (точность размера, точность формы – отклонение от плоскостности). Для этого используется выражение баланса перемещений при упругой деформации детали. При лезвийной обработке можно считать, что съем материала равен фактической глубине резания (t_ϕ):

$$t_\phi = t - \Delta_{упр.}, \quad (5)$$

где t – заданная глубина резания.

Тогда формируемый размер детали (толщина стенки H_d) будет равен:

$$H_d = H_{заг} - t_\phi = H_{заг} - t + \Delta_{упр.}, \quad (6)$$

где $H_{заг}$ – толщина стенки заготовки.

Рассмотрен пример расчета значений показателей точности стенки толщиной $H = 7$ мм, высотой $A = 125$ мм и длине стенки $L = 220$ мм при черновом фрезеровании (глубина резания $t = 4$ мм) и чистовое (глубина резания $t = 1$ мм). Результаты расчета представлены на рисунке 5.

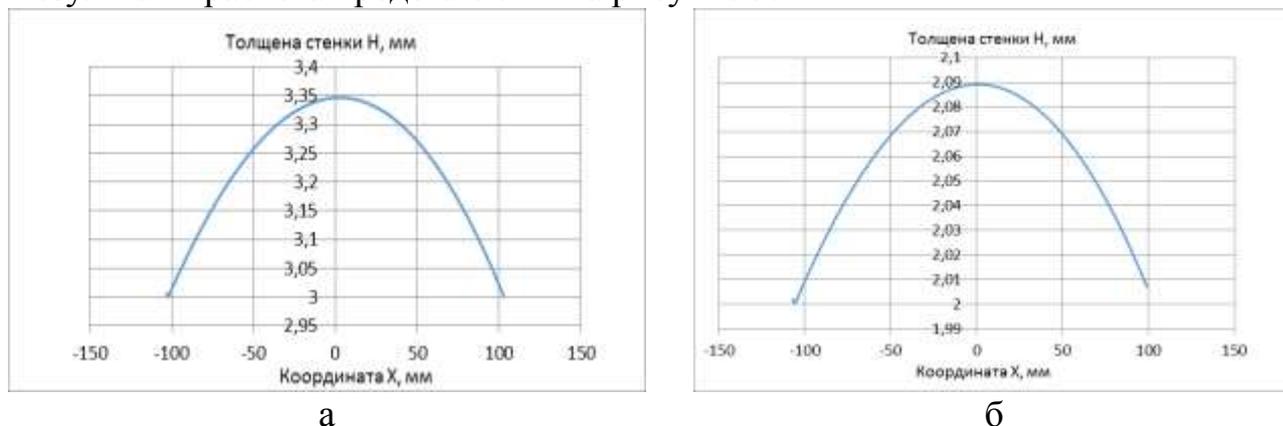


Рисунок 5 – Значения толщины стенки при а) черновом и б) чистовом фрезеровании

Максимальное и минимальное значения толщины стенки при чистовом фрезеровании: $H_{\max} = 2,089$ мм, $H_{\min} = 2,000$ мм. Величина отклонения формы (отклонение от плоскостности) составила 0,089 мм.

В четвёртой главе представлена методика управления показателями точности и шероховатости поверхности на операции фрезерования корпусных деталей с нежесткими стенками из стеклопластика. Ядром методики является двухконтурная система стабилизации упругих деформаций нежесткой стенки заготовки. Первый контур управления на основе расчетно-экспериментальной модели выполняет прогнозирование режимов резания, которые обеспечивают максимальную производительность для заданной точности и шероховатости исходя из конструкции заготовки и физико-механических свойств обрабатываемого материала. При этом режимы резания выбираются с учетом жесткости детали на разных участках и изменяются в ходе обработки. Второй контур, используя систему адаптивного управления, должен свести к минимуму влияние изменения состояния инструмента и случайного изменения жесткости заготовки, которое будет проявляться в следствие нестабильности её физико-механических свойств.

Для формализации методики разработан алгоритм (рисунок 6). Работа алгоритма начинается с ввода исходных данных после чего запускается первый контур, где анализируется конструкция стенки: устанавливаются участки для моделирования. Затем, при наличии коэффициентов расчетно-экспериментальной модели, находятся режимы резания на которых можно обеспечить заданные размер, форму и шероховатость обработанной поверхности. На полученных режимах выполняется фрезерования с непрерывной оценкой силы резания с помощью динамометра. Если сила резания не превышает критическое значение, считается что параметры качества обеспечены, работа алгоритма завершается. При отсутствии коэффициентов модели, для их поиска проводится эксперимент.

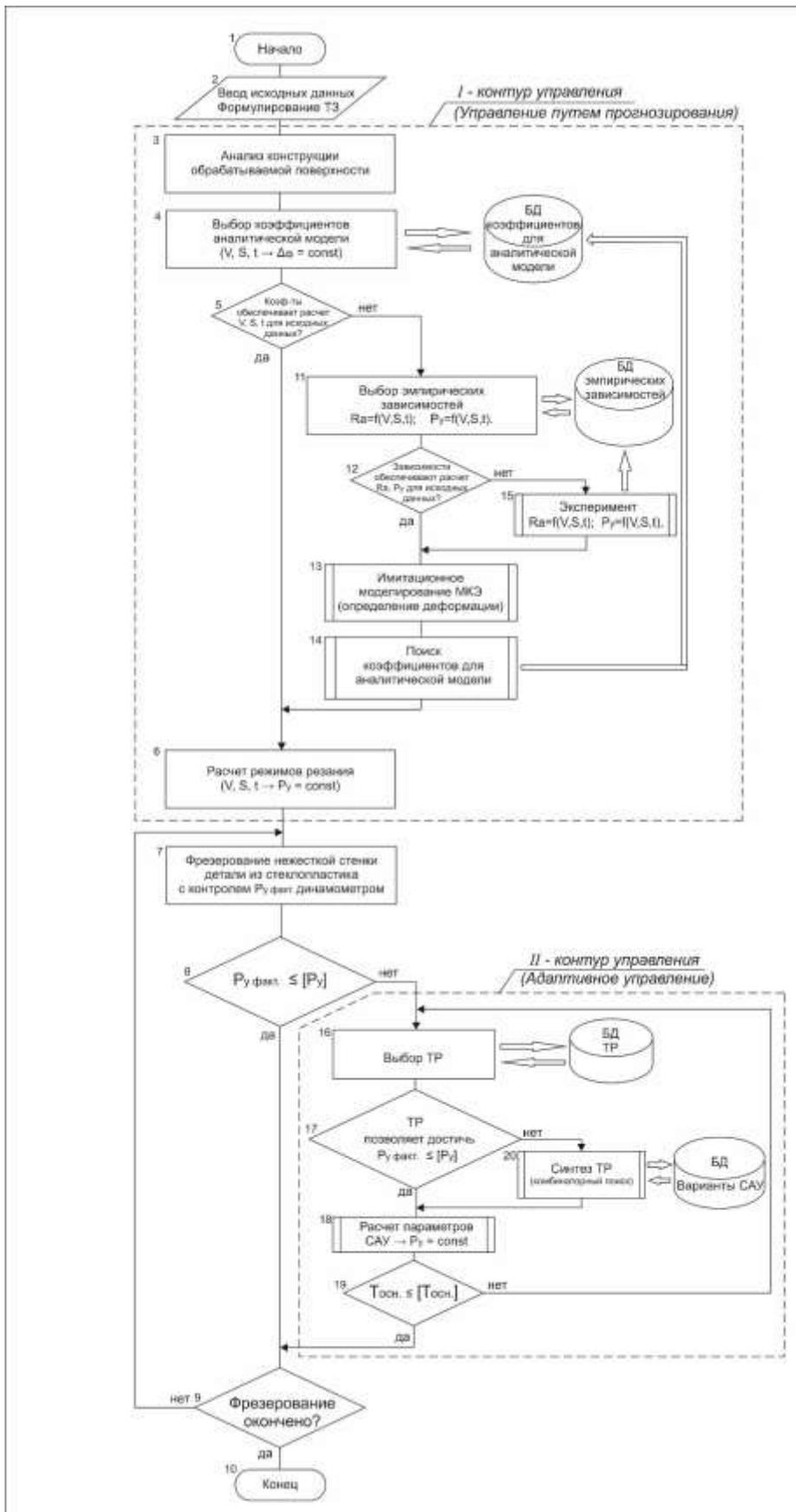


Рисунок 6 – Алгоритм управления показателями точности и шероховатости поверхности на операции фрезерования корпусных деталей с нежесткими стенками из стеклопластика

Если при рассчитанных режимах резания процесс фрезерования не обеспечивает стабильность процесса и сила резания превышает критическое значение в работу включается второй контур управления, основанный на применении адаптивного управления, который должен корректировать условия резания для ограничения силы резания. При наличии подходящей системы адаптивного управления, рассчитываются её параметры и проверяется получаемая производительность. Если все условия выполнены работа алгоритма завершается. Если ни одна из имеющихся в базе данных систем адаптивного управления не позволяет достичь условия при котором сила резания не превысит критическое значение и обеспечится заданная производительность, то выполняется комбинаторный поиск нового технологического решения адаптивного управления и цикл повторяется до достижения условий.

Для демонстрации работоспособности предложенного алгоритма рассмотрен пример изготовления корпусной детали из стеклопластика с нежесткими стенками – «Корпус геодезического прибора» (рисунок 7).

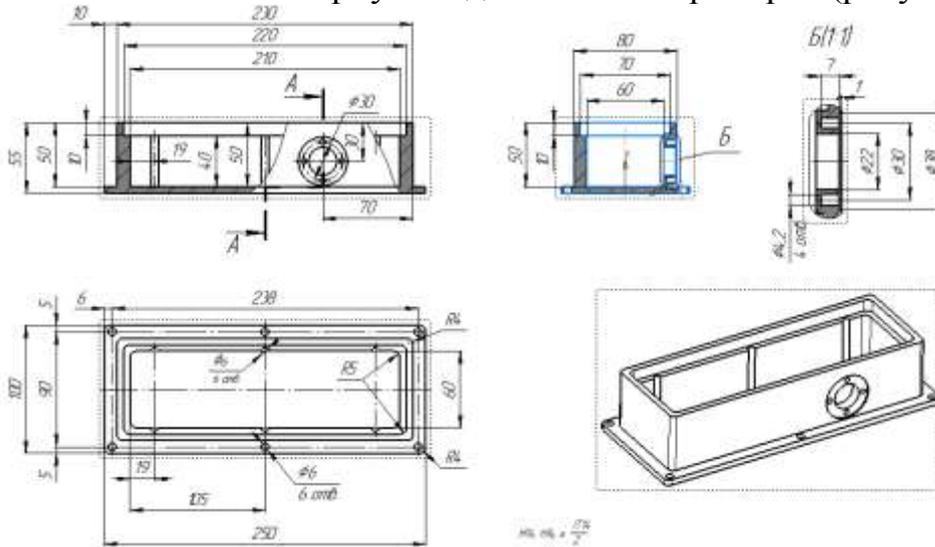


Рисунок 7 – Фрагмент чертежа корпуса элемента геодезического комплекса

К детали предъявляются следующие технические требования:

- шероховатость обработанной поверхности $Ra = 4$ мкм;
- отсутствие дефектов в виде прижогов и деструкции;
- отклонение от плоскостности $\Delta_{\text{ф}}$ не более 0,1 мм на длине 230 мм;

Деталь изготавливается из стеклопластика и имеет в конструкции нежесткую стенку, требующую фрезерования. При фрезеровании в результате больших упругих деформаций стенка получается с дефектом формы в виде отклонения от плоскостности. Для исключения брака, в действующем технологическом процессе, снижают режимы резания, но даже такие меры не гарантируют его отсутствие.

При первом варианте фрезерования на режимах резания из рекомендаций справочной литературы, без использования алгоритма, результат фрезерования показывает отклонение от плоскостности 0,178 мм, что больше требуемого (0,1 мм).

При использовании первого контура алгоритма по выбранным коэффициентам модели на основе информации о деформации стенки рассчитаны режимы резания, которые обеспечат стабильную силу резания и приемлемую погрешность размера и формы обрабатываемой стенки на черновом (таблица 1) и чистовом фрезеровании.

Таблица 1 – Изменяемые режимы резания, значения сил резания и толщина стенки при черновом фрезеровании с использованием первого контура системы управления технологической системой

Участок	1	2	3	4	5
V, м/мин	190	190	190	190	190
t, мм	4	4	4	4	4
Фрезерование острозаточенным инструментом					
S _z (var), мм/зуб	0,088	0,075	0,052	0,074	0,087
P _y , Н	198,57	184,81	156,75	183,71	197,54
t _ф , мм	3,903	3,905	3,907	3,906	3,902
Толщина стенки – A, мм	6,097	6,095	6,093	6,094	6,098

Отклонение от плоскостности на черновом переходе фрезерования не превышает $\Delta_{\phi} = 0,05$ мм, на чистовом – 0,013 мм.

Однако при экспериментальной проверке результатов, отклонение от плоскостности (Δ_{ϕ}) нежесткой стенки в партии деталей, в нескольких случаях, показало превышение требуемого значения (рисунок 8). Объяснить такой результат можно нестабильностью физико-механических свойств заготовок.

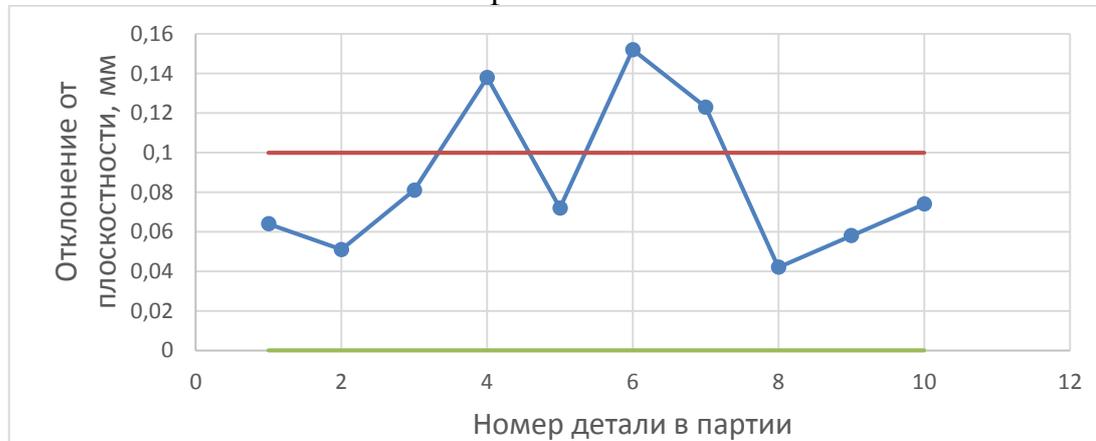


Рисунок 8 – Отклонение от плоскостности нежесткой стенки в партии деталей

Согласно алгоритму, для исключения влияния случайных факторов (физико-механических свойств материала заготовки и др.) на процесс обеспечения заданной точности при чистовом фрезеровании, помимо изменяемых режимов резания, рассчитанных с помощью аналитической модели, необходимо использовать адаптивную систему управления, корректирующую режимы резания для достижения стабильности силы резания и снижения количества брака. Для разработки способа адаптивного управления использовался комбинаторный поиск. Патентный и литературный обзор позволил построить И-ИЛИ-дерево технологических решений для управления показателями точности и шероховатости поверхности (рисунок 9).



Рисунок 9 – Объединенное И-ИЛИ-дерево TR

В результате синтезированы технологические решения из которых выбрано 2 наиболее удовлетворяющих условиям обеспечения технических требований на операции фрезерования. Первый способ позволяет выбирать максимальную подачу при обработке, тем самым увеличить производительность, но при этом не превысить критическую температуру, используя косвенный параметр – силу резания (подана заявка на патент). Второе решение основано на непрерывной оценке силы резания в процессе обработки и корректировки подачи для стабилизации силы резания и обеспечения постоянства фактической глубины резания. На разработанный способ получен патент № RU 2806119 С1 от 26.10.2023.

Реализация синтезированных способов адаптивного управления осуществлялась в виде системы стабилизации силы резания с отрицательной обратной связью, позволяющая изменять величину подачи в зависимости от силы резания, её структурная схема представлена на рисунке 10.

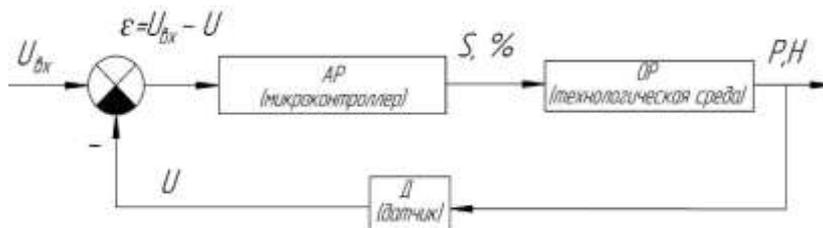


Рисунок 10 – Структурная схема системы стабилизации силы резания: AP – автоматический регулятор (микроконтроллер); OP – объект регулирования (технологическая система); D – датчик (динамометр)

Объект регулирования описывается степенными зависимостями (1) и, поэтому, является нелинейным. Для применения классических методов анализа устойчивости проведена его линеаризация. В качестве автоматического регулятора выбран П-регулятор. Его передаточная функция $W_{AP} = k_0$. Объект регулирования является аperiодическим звеном. Передаточная функция всей системы примет вид:

$$W_0 = \frac{W_{AP}W_{OP}}{1+W_{AP}W_{OP}W_D} = \frac{k(a_2s^2+a_1s+1)}{b_3s^3+b_2s^2+b_1s+1'}$$

где k - коэффициент передачи всей системы, a_1, a_2, b_1, b_2, b_3 —коэффициенты передаточной функции системы. Коэффициенты передаточных функций технологической системы и датчика определяются при аттестации системы. Оценка устойчивости системы управления выполнена по критерию Михайлова. Для разработанной схемы условие устойчивости выполняется при коэффициенте усиления $AP k_0 < 550 \text{ В}^{-1}$. Предложенная система адаптивного управления позволяет стабилизировать силу резания, реагируя на внешние возмущения в виде изменения припуска, затупления инструмента, изменение твердости в объеме заготовке и т.п.

В результате использования второго контура системы управления точностью размера, формы и шероховатости, отклонение от плоскостности стенки корпуса не превысило 0,072 мм для всей партии деталей.

Оценка эффективности внедрения предложенного способа адаптивного управления операцией фрезерования детали с нежесткими стенками «Корпус геодезического прибора» принятого к использованию на ООО «Станкоцентр Перун», позволил снизить уровень брака на 70% при сохранении производительности. Суммарный ожидаемый экономический эффект от внедрения составляет более 159,1 тысяч рублей при программе выпуска 2500 штук в год.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Анализ механизма образования погрешности и формирования показателей точности размеров, формы и шероховатости поверхностей нежестких стенок корпусных деталей из стеклопластика на операциях фрезерования показал, что при назначении параметров обработки, использование только методов прогнозирования, с использованием математических моделей, недостаточно. Для полной компенсации изменяющихся условий обработки необходимо применение системы адаптивного управления.

2. Полученные зависимости величины составляющих сил резания и шероховатости обработанной поверхности от режимов резания при фрезеровании корпусных деталей с нежесткими стенками из стеклопластика с учетом изменения состояния инструмента за период его стойкости показали, что наибольшее влияние на силу и шероховатость оказывает подача.

3. Предложенная расчетно-экспериментальная модель прогнозирования показателей точности размера и отклонения формы при фрезеровании корпусных деталей с нежесткими стенками из стеклопластика, позволила определить, что основным фактором, при формировании погрешности обработанной поверхности, являются упругие деформации в заготовке, составляющие в ряде случаев до 95 % от общей погрешности.

4. Использование метода поискового проектирования технологических решений позволил синтезировать способы адаптивного управления, обеспечивающие достижение показателей точности и шероховатости при фрезеровании корпусных деталей с нежесткими стенками из стеклопластика в изменяющихся условиях обработки, обладающие признаками патентной чистоты, которые заявлены в качестве изобретений на способ (патент №2806119 от 26.10.2023 и заявка №2023128683 от 03.11.2023).

5. Предложенная методика и разработанный на её основе алгоритм управления показателями точности размера, формы и шероховатости поверхности на операции фрезерования корпусных деталей с нежесткими стенками из стеклопластика, использующие двухконтурную систему прогнозирования и адаптивную стабилизацию упругих деформаций, позволяют назначать режимы резания для обеспечения заданных показателей качества.

6. Эффективность предложенных решений подтверждена в производственных условиях ООО «Станкоцентр Перун» (г. Барнаул). За счет сочетания динамической стабилизации показателей точности и шероховатости обработанных поверхностей стенок корпусной детали (отклонение от плоскостности и среднее арифметическое отклонение профиля) и исключения прижогов в процессе фрезерования при изготовлении детали «Корпус геодезического прибора» рост производительности составил 17%. Получен экономический эффект более 159 тысяч рублей (программа выпуска 2500 штук в год).

7. Методические рекомендации внедрены в учебном процессе кафедры «Технология машиностроения» при реализации курсов «Компьютерное моделирование в машиностроении», «Металлорежущий инструмент» для бакалавров и магистров по направлению «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», «Методы и техника эксперимента» ФГБОУ ВО «Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова».

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

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

1. Гайст С.В. Способ адаптивного управления процессом резания при механической обработке деталей из композиционных материалов / Гайст С.В., Леонов С.Л., Марков А.М., Некрасов В.Н. // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2023. – № 2 (156). – С. 15-27.

2. Марков А.М. Технологическое обеспечение качества поверхностного слоя стекловолоконных композитов при концевом фрезеровании / А.М. Марков, В.Н. Некрасов, Ц. Су, А.М. Салман, С.В. Гайст, М.В. Андреев. // Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты). – 2020. – Т. 22. – № 4. – С. 31-40.

3. Марков А.М. Исследование влияния показателей качества обработанной поверхности на прочностные характеристики деталей из композиционного материала / А.М. Марков, В.Н. Некрасов, М.В. Андреев, С.В. Гайст, Ц. Су, С.А. Мансур // Вестник Кузбасского государственного технического университета. – 2020. – № 6 (142). – С. 5-12.

4. Марков А.М. Износ инструмента при фрезеровании стеклопластика / А.М. Марков, Н.А. Макарова, С.В. Гайст // Научные технологии в машиностроении. – 2017. – № 4 (70). – С. 25–30.

Патенты:

5. Гайст С.В, Марков А.М. Способ обработки деталей, содержащих пространственно-сложные поверхности, на станках с ЧПУ: патент на изобретение № RU 2806119 С1 от 26.10.2023.

6. Гайст С.В, Леонов С.Л., Марков А.М, Некрасов В.Н. Стабилизация упругих отжатий при механической обработке: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № RU 2023617302 от 07.04.2023.

7. Катаева С.А., Марков А.М., Черданцев П.О., Гайст С.В. Концевая фреза: патент на изобретение № RU 2606133 С от 10.01.2017.

8. Гайст С.В., Лапенков Е.Ю., Марков А.М., Потапов И.С., Черданцев А.О., Черданцев П.О., Шитюк А.А. Многокомпонентный динамометр: патент на полезную модель № RU 169315 U1 от 15.03.2017.

Публикации в других изданиях:

9. Марков А.М. Исследование механизма резания армированных стекловолоконистых композиционных материалов при фрезеровании и анализ их микрофотографий / А.М. Марков, В.Н. Некрасов, Ц. Су, А.М. Салман, С.В. Гайст // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2020. – № 8. – С. 11-16.

10. Гайст С.В. Влияние износа режущего инструмента на процесс стружкообразования при фрезеровании композиционного материала / С.В. Гайст, А.М. Марков, А.М. Салман // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2018. – Т. 5. – № 1-2. – С. 42–47.

11. Марков А.М. Методика экспериментально-аналитического определения силы резания при механической обработке / А.М. Марков, С.В. Гайст, А.М. Салман // В сборнике: Инновации в машиностроении: сборник трудов IX Международной научно-практической конференции. – 2018. – С. 238–241.

12. Марков А.М. Исследование силы резания при высокоскоростном фрезеровании композиционных материалов / А.М. Марков, П.О. Черданцев, С.В. Гайст, А.О. Черданцев, Е.Ю. Лапенков, И.С. Потапов // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2017. – Т. 4. – № 4. – С. 45–51.

13. Марков А.М. Особенности обработки сигналов, получаемых от пьезоэлектрических датчиков динамометра для измерения сил резания / А.М. Марков, С.Л. Леонов, П.О. Черданцев, А.О. Черданцев, С.В. Гайст, Е.Ю. Лапенков // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2017. – Т. 4. – № 4. – С. 89–93.

14. Гайст С.В. Экспериментальное исследование процесса формирования показателей качества при фрезеровании стеклопластика / С.В. Гайст, С.А. Катаева, А.М. Марков, П.О. Черданцев, Е.Ю. Лапенков. // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2016. – № 3 (51). – С. 129–136.

15. Марков А.М. Классификация способов управления показателями точности при обработке стеклопластиков / А.М. Марков, П.О. Черданцев, С.В. Гайст, С.А. Катаева, Е.Ю. Лапенков // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2016. – № 3. – С. 93-99.

16. Гайст С.В. Исследование температуры при фрезеровании стеклопластика / С.В. Гайст, А.М. Марков, П.О. Черданцев, С.А. Катаева, Е.Ю. Лапенков // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2016. – № 3. – С. 123-128.

17. Катаева С.А. Конструкции фрез для обработки стеклопластиков / С.А. Катаева, А.М. Марков, П.О. Черданцев, С.В. Гайст, Е.Ю. Лапенков // Актуальные проблемы в машиностроении. – 2016. – № 3. – С. 307-312.

18. Лапенков Е.Ю. Система управления формообразованием при обработке деталей из композиционного материала / Е.Ю. Лапенков, С.В. Гайст, А.М. Марков, П.О. Черданцев // Ползуновский альманах. – 2016. – № 4. – С. 59–62.

19. Гайст С.В. Исследование процесса фрезерования стеклопластика / С.В. Гайст, С.А. Катаева, А.М. Марков, П.О. Черданцев, Е.Ю. Лапенков // В сборнике: Научноёмкие технологии на современном этапе развития машиностроения: материалы VIII Международной научно-технической конференции. – 2016. – С. 42–48.

20. Лапенков Е.Ю. Исследование процесса фрезерования стеклопластиков / Е.Ю. Лапенков, С.А. Катаева, С.В. Гайст, П.О. Черданцев, А.М. Марков // Вестник алтайской науки. – 2015. – № 3–4 (25–26). – С. 39–44.

21. Марков А.М. Экспериментальные исследования фрезерования композиционных материалов / А.М. Марков, П.О. Черданцев, С.В. Гайст, С.А. Катаева // В сборнике: Инновации в машиностроении (ИНМАШ-2015). – 2015. – С. 99–104.

22. Гайст С.В. Исследование износа инструмента при фрезеровании стеклопластика / С.В. Гайст, О.А. Барсукова, П.О. Черданцев, С.А. Катаева, А.М. Марков // В сборнике: Молодежь – Барнаулу: Материалы XVI научно-практической конференции молодых ученых. – 2014. – С. 415–417.

23. Гайст С.В. Особенности фрезерования заготовок из композиционных материалов (стеклопластика) / С.В. Гайст, О.А. Барсукова // Педагогическое образование на Алтае. – 2014. – № 2. – С. 193-194.

24. Марков А.М. Методика исследования износа инструмента на операциях фрезерования стеклопластиков / А.М. Марков, П.О. Черданцев, С.В. Гайст, О.А. Барсукова // Актуальные проблемы в машиностроении, – 2014. – № 1 – С. 193-197.

25. Катаева С.А. Особенности выбора режущего инструмента для фрезерования стеклопластика / С.А. Катаева, С.В. Гайст // В сборнике: Молодежь – Барнаулу: Материалы XVI научно-практической конференции молодых ученых. – 2014. – С. 432–435.

Подписано в печать 17.06.2025 г. Заказ № _____. Тираж 100 экз. Печ. л. 1,16
Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Издательско-полиграфический центр Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова. 656038, г. Барнаул, пр. Ленина, 46.