На правах рукописи



ШВАРЦ АЛЕКСАНДР ИГОРЕВИЧ

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ И ШЕРОХОВАТОСТИ ПРИ РОБОТИЗИРОВАННОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ КРИВОЛИНЕЙНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ОСНОВЕ СРЕДСТВ АДАПТАЦИИ

Специальность 2.5.6 – Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2026

Работа выполнена на кафедре «Технологии и оборудование машиностроения» федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский политехнический университет», г. Москва.

Научный руководитель:
Вартанов Михаил Владимирович
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технологии и оборудование машиностроения», федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Московский политехнический университет», г. Москва

Официальные оппоненты:
Волков Дмитрий Иванович
доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Инновационного машиностроения» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева», г. Рыбинск

Польский Евгений Александрович
кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Технология машиностроения» федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Брянский государственный технический университет», г. Брянск

Ведущая организация:
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Севастопольский государственный университет», г. Севастополь

Защита диссертации состоится «23» декабря 2026 г. в 11:00 на заседании диссертационного совета 24.2.332.01 на базе ФГАОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН»» по адресу: 127055, г. Москва, Вадковский переулок, д. 1.
С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Московский государственный технологический университет «СТАНКИН»» и на сайте https://stankin.ru/nauka-i-innovatsii/dissertatsionnye-sovety-i-doktorantura/dissertatsionnye-sovety/24-2-332-01-d-212-142-01/shvarts-aleksandr-igorevich/index.php
Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные гербовой печатью учреждения (организации), просим направлять в диссертационный совет 24.2.332.01 по вышеуказанному адресу на имя ученого секретаря совета.
Автореферат разослан «___» _____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета
24.2.332.01, к.т.н., доцент  Е.С. Сотова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В настоящее время при изготовлении деталей сложной конфигурации остается высокой доля ручных слесарных операций. Автоматизация данных операций позволяет повысить надежность и производительность технологического процесса изготовления. Одним из вариантов решения является применение промышленных роботов, которые имеют ряд преимуществ в сравнении с классическими станками (более низкая стоимость, низкие эксплуатационные расходы, большие возможности переналадки). Автоматизация этих операций позволит сократить затраты, связанные с использованием труда высококвалифицированных рабочих. Применение средств активной и пассивной адаптации позволяет обеспечить качество при механической обработке и минимизировать брак в производстве.

Степень разработанности темы. Значительное развитие данной научной отрасли стало возможным благодаря трудам ученых: Афонин В.Л., Пономарев Б.Б., Сидорова А.В., Полетаев В.А., Волков Д.И., Вартанов М.В., Panuramines J., Doulas C., Stavropoulos P., Chrysidoids G., Pan Z., Zhang H., Olufsen B., Schneider U., Robertson A., Johansson R., Chen F., Zhao H., Li D., Chen L., Tan C., Ding H и др.

В настоящее время остаются востребованными исследования в области механической обработки в условиях неравномерного припуска, которые позволят обеспечить технологические требования и автоматизировать ручные слесарные операции.

Целью работы является технологическое обеспечение качества криволинейных поверхностей при роботизированной обработке в условиях неравномерного припуска.

В диссертационном исследовании решались следующие задачи:

1) исследование технологических режимов как основы для разработки алгоритма порогового управления оборудованием;
2) разработка адаптивного алгоритма управления для реализации процесса механической обработки заготовок с переменным (неравномерным) припуском;
3) разработка постпроцессора оборудования для реализации механической обработки;
4) создание методики и проведение физического эксперимента на заготовках с неравномерным припуском;
5) планирование эксперимента, установление взаимосвязей между технологическими режимами и шероховатостью поверхности;
6) апробация разработанного алгоритма на промышленной детали.

Объект исследования: криволинейные поверхности заготовок деталей

машин с неравномерным припуском.

Предмет исследования: технологические регламенты операций роботизированной механической обработки с использованием алгоритма управления.

Научная новизна исследования:

– алгоритм управления оборудованием на операции тонкого фрезерования с коррекцией технологической подачи в условиях неравномерного припуска;

– экспериментальные взаимосвязи режимов резания, кинематики оборудования и качества поверхности детали (шероховатость и точность обработки).

Теоретическая значимость заключается в установлении взаимосвязей жесткости промышленного робота, технологических режимов и качества поверхности детали, реализуемых при использовании алгоритма позиционного-силового управления.

Практическая значимость исследования:

– разработка экспериментального стенда на базе промышленного робота (ПР), дооснащенного силомоментным датчиком, шпинделем и инструментом, позволяющего проводить исследование процесса резания в условиях, приближенных к производственным;

– разработка рекомендаций по обоснованному выбору технологических режимов (ТР), обеспечивающих стабильность процесса и качество поверхности деталей;

– создание и апробация алгоритмического и программного обеспечения, реализующего принципы порогового позиционно-силового управления при выполнении операций механической обработки.

Методы и средства исследований. Теоретической базой диссертационного исследования послужили научные основы технологии машиностроения, классические положения теоретической механики и теории резания. При решении задач применялись методы линейной алгебры, аналитической геометрии и вычислительной математики. Компьютерное моделирование выполнялось с использованием RobotStudio, Autodesk Inventor, Autodesk PowerMill, СПРУТКАМ. Математическое моделирование и расчеты выполнялись с помощью MATLAB, Microsoft Excel.

Основные положения, выносимые на защиту:

– алгоритм управления манипулятором на основе обратной связи при тонком фрезеровании;

– экспериментальные взаимосвязи технологических режимов, кинематики промышленного робота и качества поверхности детали (точности и

шероховатости).

Степень достоверности и апробация результатов работы.

Достоверность научных выводов обеспечивается:

– корректным применением научных основ технологии машиностроения;

– использованием фундаментальных теоретических положений и современных инструментов компьютерного моделирования;

– использованием современного технологического оснащения при проведении эксперимента;

– сходимостью экспериментальных результатов и их согласованностью с известными исследованиями в рассматриваемой области.

Основные положения диссертации обсуждались на научно-технических конференциях и семинарах: «Современные тенденции развития инструментальных систем и металлообрабатывающих комплексов» (тема доклада: Роботизированное полирование плоских поверхностей с применением нейронных сетей) май 2023 г.; «Машиностроительные Технологические Системы» (тема доклада: Обеспечение качества поверхности при роботизированной обработке в условиях неравномерного припуска) апрель 2025 г.; «Актуальные проблемы науки и техники» (тема доклада: Технологическое обеспечение роботизированной отделочной обработки криволинейных поверхностей) март 2025 г.; «Наукоёмкие технологии в машиностроении: современные тренды, перспективы развития и опыт подготовки инженерных кадров 2025» сентябрь 2025 г. (тема доклада «Технологическое обеспечение качества при роботизированной отделочной обработке на основе средств адаптации» г. Алушта).

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Работа соответствует паспорту научной специальности 2.5.6 «Технология машиностроения» в пунктах:

4) совершенствование существующих и разработка новых методов обработки и сборки с целью повышения качества изделий машиностроения и снижения себестоимости их выпуска;

7) технологическое обеспечение и повышение качества поверхностного слоя, точности и долговечности деталей машин;

Основные публикации. По теме диссертации опубликовано 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК; получено свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ; получены 2 акта о внедрении.

Структура диссертации. Диссертация содержит введение, четыре главы, заключение и список литературы. Объем диссертации – 136 страниц машинописного текста, содержит 51 рисунок, 20 таблиц и 15 страниц

приложений. Список цитируемой литературы включает 95 наименования.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертации, показана степень ее разработанности, сформулированы основные цели и задачи, сформулированы научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы и положения, выносимые на защиту, описана методология и методы исследования, перечислены полученные автором результаты работы, представлена структура диссертации.

В первой главе проанализированы существующие научные подходы к вопросам роботизированной механической обработки и задачи повышения технологической надежности процесса механической обработки криволинейных поверхностей, сформулированы цель и научные задачи работы. Проведен анализ известных технологических решений для подавления вибраций при роботизированной обработке. Выбор метода определяется в первую очередь требованиями к детали. Для решения данной задачи целесообразно использовать адаптивные устройства. Подобные устройства делятся на две основные группы: пассивные и активные.

Принципы адаптивного пассивного оборудования основаны на применении упругих звеньев и подавлении вибрации за счет податливости инструмента. Данной группе устройств характерна конструктивная простота и невысокая стоимость. Однако для деталей с различной геометрией необходимо проектировать и изготавливать специальные устройства пассивной адаптации, что затрудняет технологическую подготовку производства. Активные адаптивные устройства основаны на автоматическом управлении с обратной связью на основе применения внешних устройств и средств очувствления.

На основе проведенного анализа установлено, что технологическая надежность операций роботизированной механической обработки может быть обеспечена на основе применения средств активной адаптации, расширяя таким образом технологические возможности роботизированной механической обработки.

Вторая глава посвящена разработке методики построения операции роботизированной механической обработки. Задача решалась в квазистатической постановке. Звенья робота и элементы технологической оснастки рассматривались как абсолютно жесткие тела. Так как ПР имеет значительно меньшую жесткость в сравнении с классическими станками ЧПУ, то для обеспечения точности необходим механизм адаптации, который позволит компенсировать недостаточную жесткость. В данной работе предложена методика проектирования операции механической роботизированной обработки на основе учета одноканальной жесткости манипулятора и неравномерности снимаемого припуска с заготовки.

На величину удельного съема материала влияют все параметры резания. Однако в случае обеспечения точности обработки необходимо управлять

подачей инструмента (скоростью перемещения выходного звена) для соблюдения величин сил резания.

Приведена структурная схема алгоритма управления при роботизированной обработке с коррекцией подачи (рисунок 1). Для процесса роботизированной механической обработки, когда ставится задача обеспечения качества поверхности и размерной точности, критически важно идентифицировать силовые факторы в зоне резания.

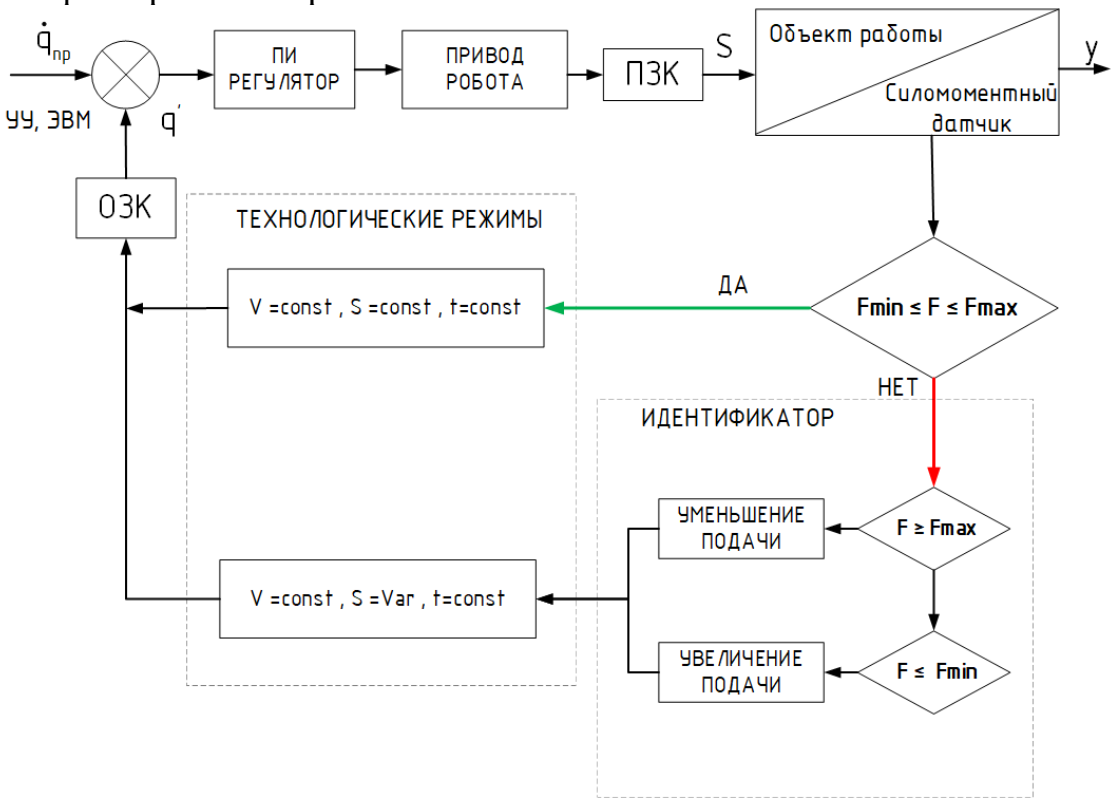


Рисунок 1 – Алгоритм управления процессом роботизированной механической обработки с использованием обратной связи: $\dot{q}_{пр}$ – программная траектория; ОЗК – расчет обратной задачи кинематики; ПЗК – расчет прямой задачи кинематики; q’ – сигнал коррекции скорости перемещения выходного звена (технологической подачи); u, S, t – технологические режимы (скорость вращения, подача, глубина резания); F_{max},F_{min} – максимальная и минимальная допустимая сила; F – силовые факторы (выводы силомоментного датчика); y – траектория движения инструмента

На входе в блок движения происходит первичная загрузка информации: модели CAD, набор команд из CAM среды для обеспечения движения промышленного робота. Одновременно с этим происходит обработка сигналов силомоментного датчика. Блок задания технологических режимов на основе сопоставления фактических силовых факторов с допустимыми является центральным регулирующим элементом алгоритма. В данном блоке выполняется сравнение двух потоков информации: текущих величин сил резания, полученных от обработчика сигналов датчика и предельных значений сил. На основе результатов этого сравнения формируется управляющее воздействие по коррекции технологических параметров.

Эксперименты со статической нагрузкой показали, что даже в диапазоне своей допустимой нагрузки выходное звено значительно смещается (рисунок 2). На основе проведенных экспериментов установлено, что жесткость промышленного робота уменьшается почти в 2 раза. Величина жесткости в определенной конфигурации ПР непосредственно влияет на величину допустимой силы резания.

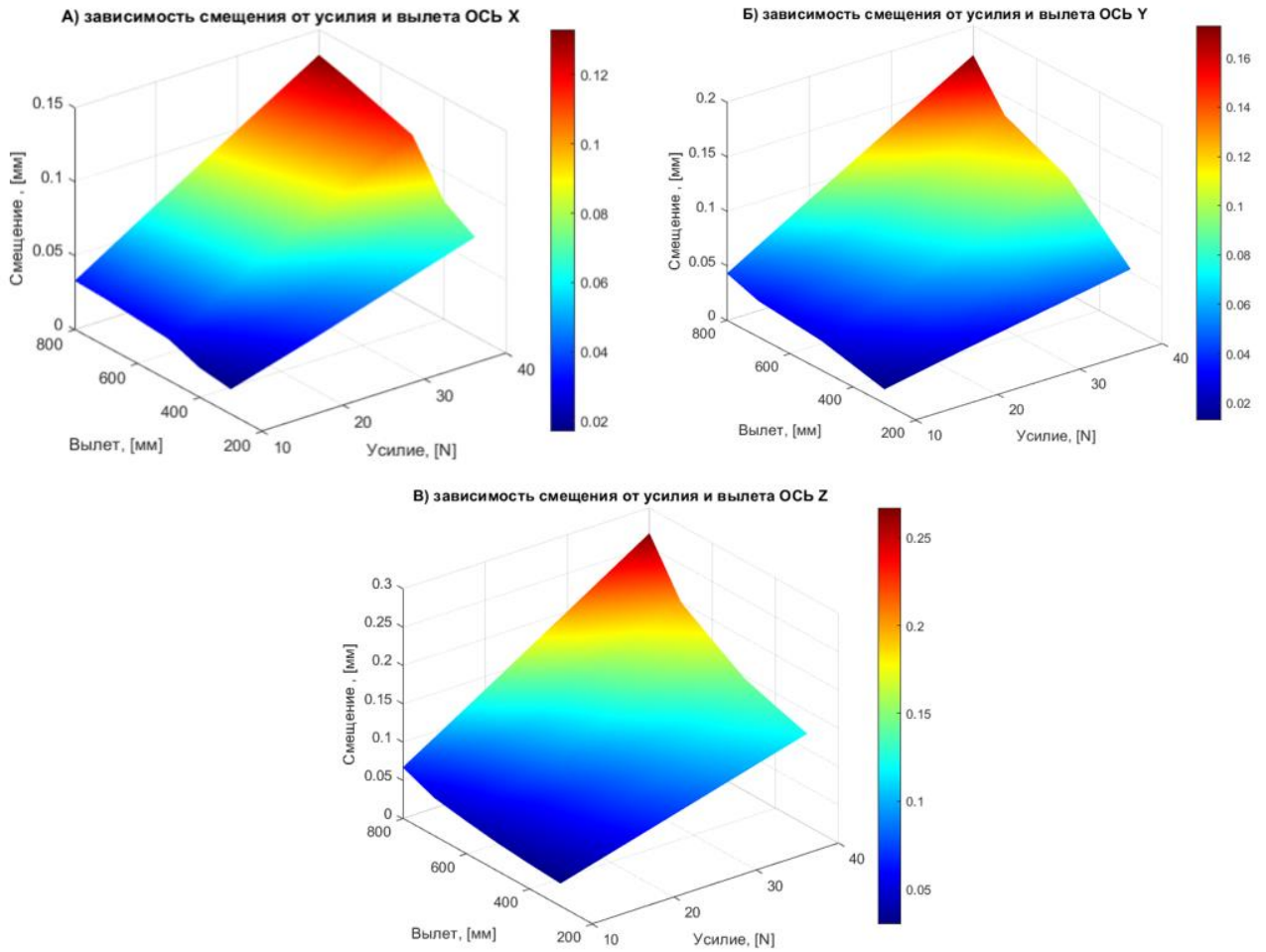


Рисунок 2 – Зависимость смещения выходного звена от расстояния до основания и величины нагрузки: а – ось x; б – ось y; в – ось z

В третьей главе для тестирования и верификации разработанного алгоритма управления роботом была создана экспериментальная установка, показанная на рисунке 3. Она состоит из промышленного робота 1 (ABB IRB 140T), выполняющего задачу обработки. Силомоментный датчик 2 установлен на выходном звене манипулятора робота для измерения силы и крутящего момента в процессе обработки. Приспособление для закрепления 4 позволяет проводить эксперименты по обработке при различных конфигурациях манипулятора. Информация о силовых факторах в процессе обработки поступает в контроллер IRC5 и в персональный компьютер, подключенный к контроллеру.

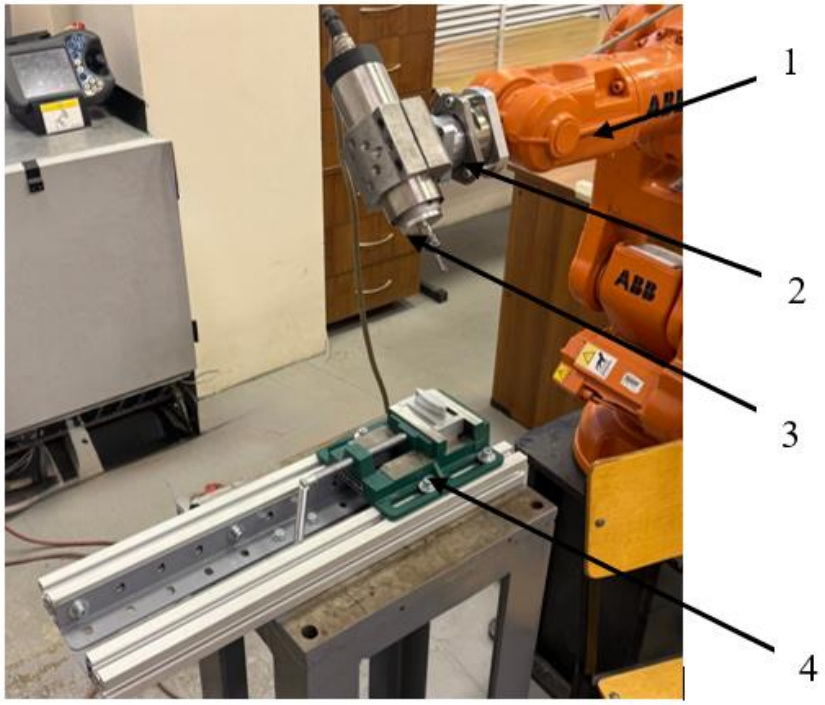


Рисунок 3 – Экспериментальная установка для исследования роботизированной обработки: 1 – робот ABB IRB 140; 2 – силомоментный датчик; 3 – шпиндель GDF65-24Z-0,8kW; 4 – приспособление с установленной заготовкой

В случаях, когда величина силовых факторов в зоне резания сопоставима с грузоподъемностью манипулятора, наблюдались вибрации оборудования и отмечалась волнистость на обработанной поверхности (рисунок 4).

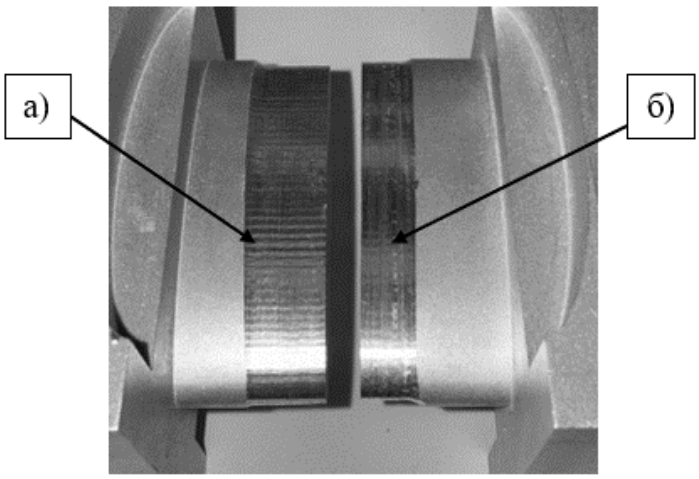
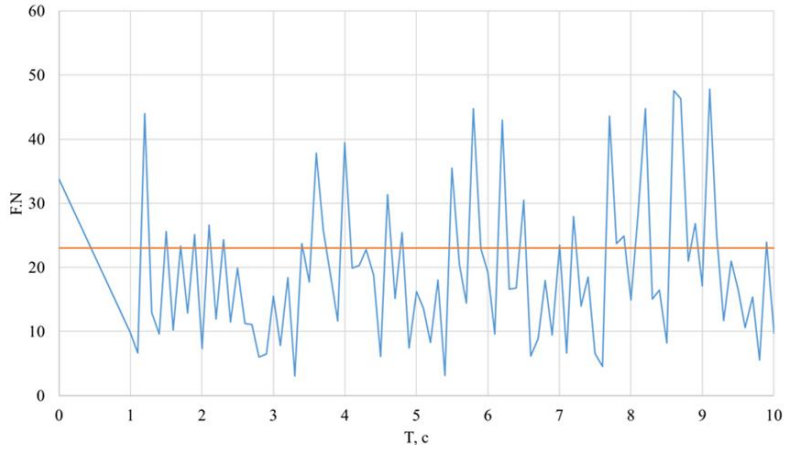
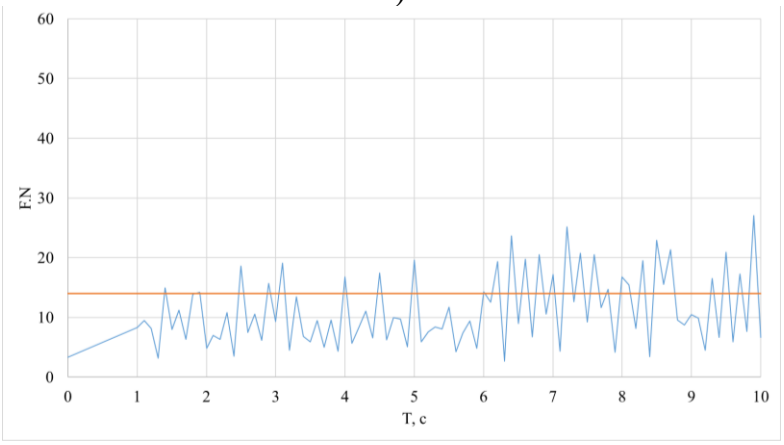


Рисунок 4 – Поверхность образца после обработки: а – при возникновении вибраций; б – при стабильном процессе обработки

В процессе обработки выполнялся онлайн мониторинг силовых факторов в зоне резания (рисунок 5). Для сравнения на выводах с СМД показана результирующая сила резания.



а)



б)

Рисунок 5 – Выводы силомоментного датчика во время пробных экспериментов: а – вибрации во время обработки; б – стабильный процесс

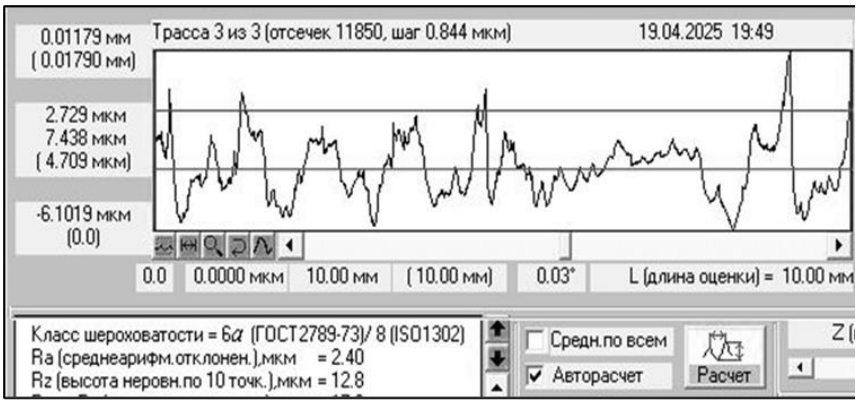
На основе результатов предварительных экспериментов можно утверждать, что с использованием алгоритма управления и подбора режимов резания значения силовых факторов на чистовом проходе значительно уменьшаются. Снижение амплитуды силовых факторов в зоне обработки положительно влияет на точность и качество получаемой поверхности.

На основе выводов с СМД рассчитывалось среднее значение силы за установленный промежуток времени. Получены следующие результаты:

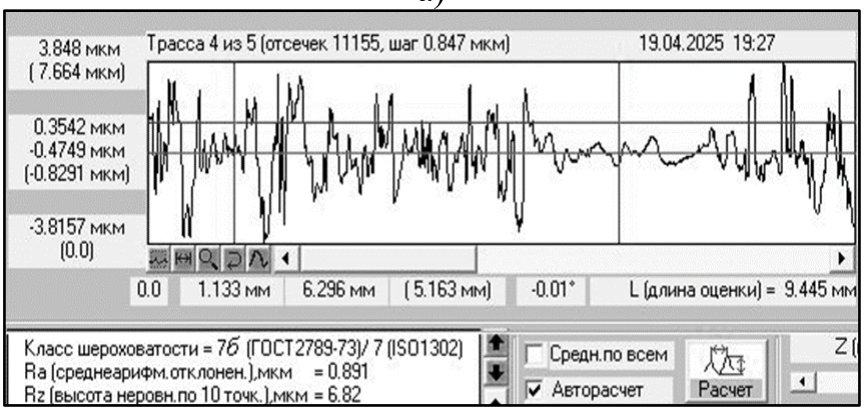
1. в случае когда наблюдались вибрации инструмента $F_{ср}$ = 23 Н;

2. при позиционно-силовом управлении и коррекции технологических режимов $F_{ср}$ = 14Н.

Для оценки качества поверхности проведены измерения шероховатости (рисунок 6). На основе измерений установлено, что шероховатость поверхности R_a, при отсутствии вибраций обеспечивает требуемое качество поверхности. Следующим этапом проверки работоспособности алгоритма была обработка заготовок с неравномерным припуском. Искусственные неровности были сформированы путем наплавки. Изменения физико-механических свойств заготовки с наплавкой не оценивались.



а)



б)

Рисунок 6 – Профилограмма обработанной поверхности: а – R_a 2.4 мкм, вибрации во время обработки б – R_a 0.9 мкм, стабильный процесс

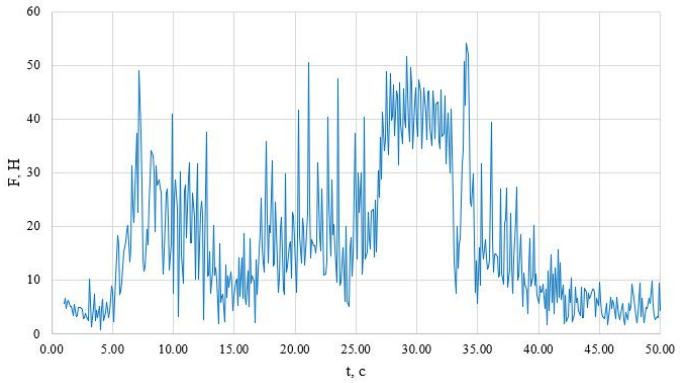
Аналогично пробным экспериментам, в случае резкого превышения силы резания возникали колебания оборудования (рисунок 7 а, б). Это не позволяло обеспечить точность и шероховатость обработанной поверхности. Также визуально наблюдалась волнистость обработанной поверхности. При обработке с использованием алгоритма управления в области экспериментально установленных технологических режимов, в моменты, когда величина наплавки не превышала допустимой глубины резания, коррекция подачи стабилизировала процесс обработки. Также установлено отсутствие колебаний промышленного робота (рисунок 7 в, г).

На основе выводов с силомоментного датчика можно утверждать:

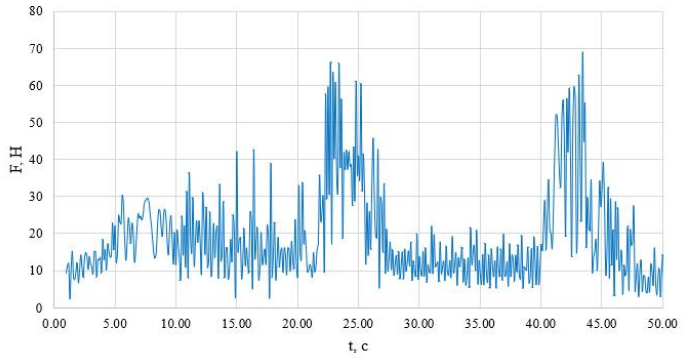
1. при превышении допустимого расчетного значения силы резания происходит коррекция подачи инструмента, стабилизируя процесс обработки;

2. имеет место стабильное протекание процесса после прохождения искусственной неровности (наплавки) при использовании разработанного алгоритма и высотах наплавок в диапазоне 0,1…0,3 мм;

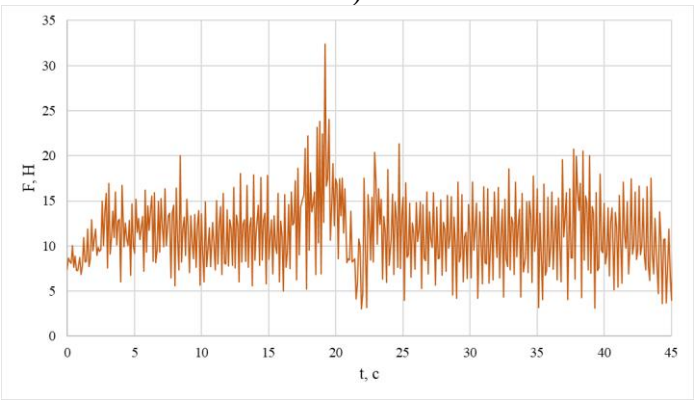
3. в случае возникновения вибраций инструмента зона колебаний силовых параметров обработки выходит за пределы искусственной неровности (наплавки).



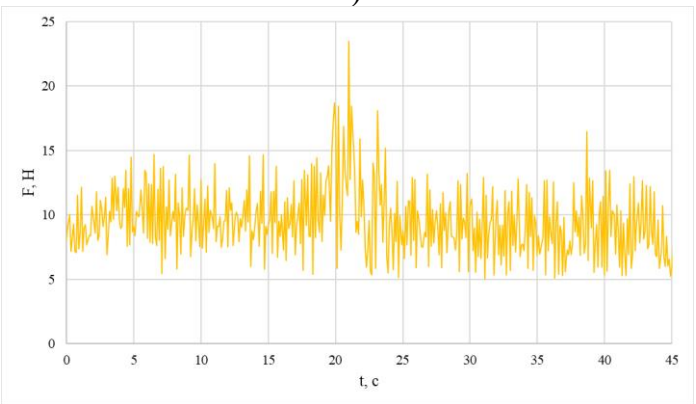
а)



б)



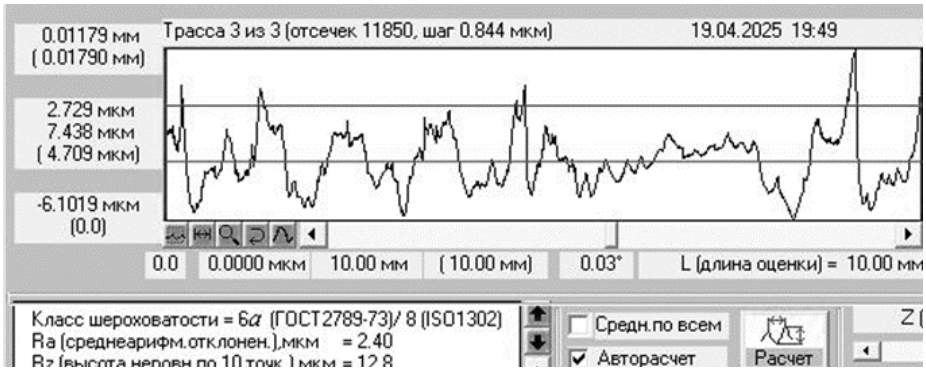
в)



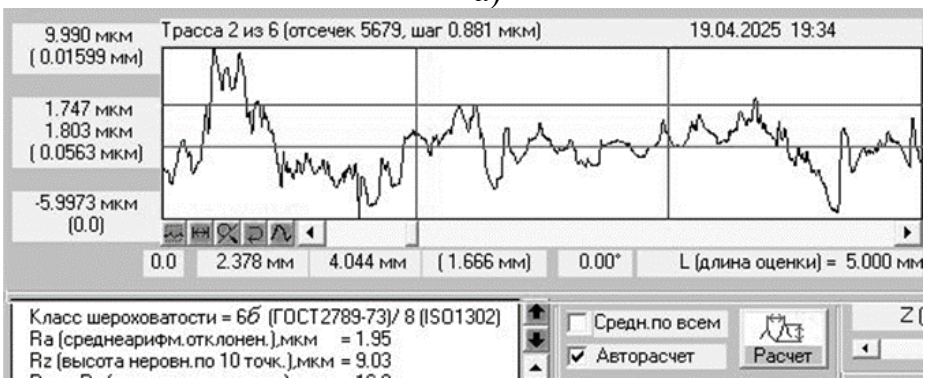
г)

Рисунок 7 – Выводы силомоментного датчика при обработке в условиях неравномерного припуска: а, б – при наличии вибраций при обработке; в, г – при стабильном процессе резания

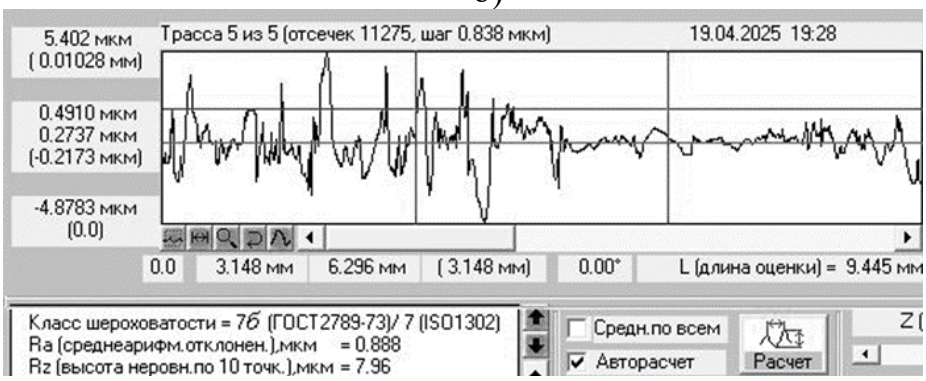
После обработки были проведены измерения шероховатости обработанной поверхности (рисунок 8).



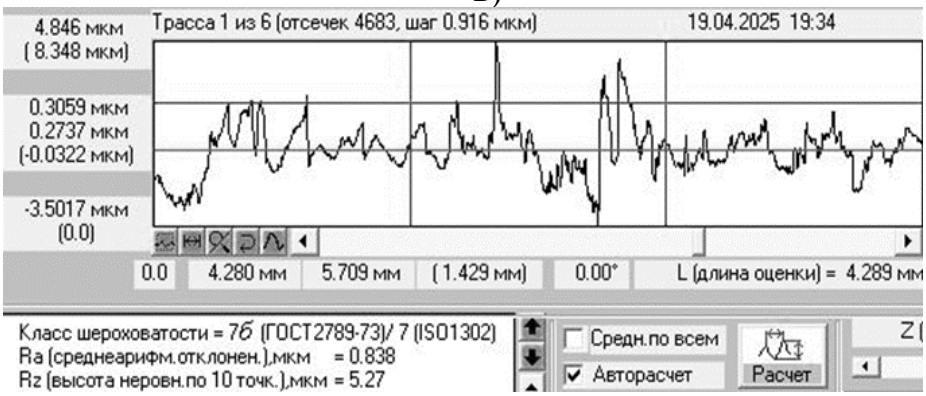
а)



б)



в)



г)

Рисунок 8 – Профилограмма обработанной поверхности:
а – R_a 2,4 мкм, расстояние 250 мм, вибрации при обработке; б – R_a 1.95 мкм, расстояние 500 мм, вибрации при обработке; в – R_a 0.9 мкм, расстояние 250 мм, стабильный процесс ; г – R_a 0.84 мкм, расстояние 500 мм, стабильный процесс

Для апробации алгоритмического и программного обеспечения производилась обработка лопатки компрессора газотурбинного двигателя. Для проверки алгоритма были использованы лопатки компрессора ГТД (материал лопатки – сплав ВТ-8) (рисунок 9 и 10).

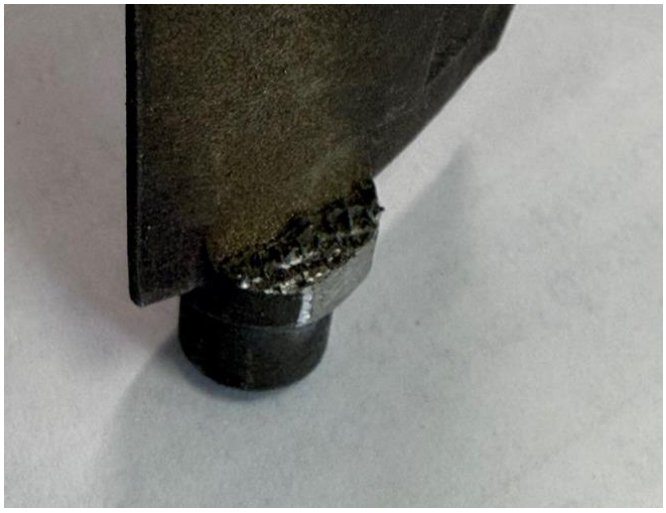


Рисунок 9 – Лопатка компрессора газотурбинного двигателя

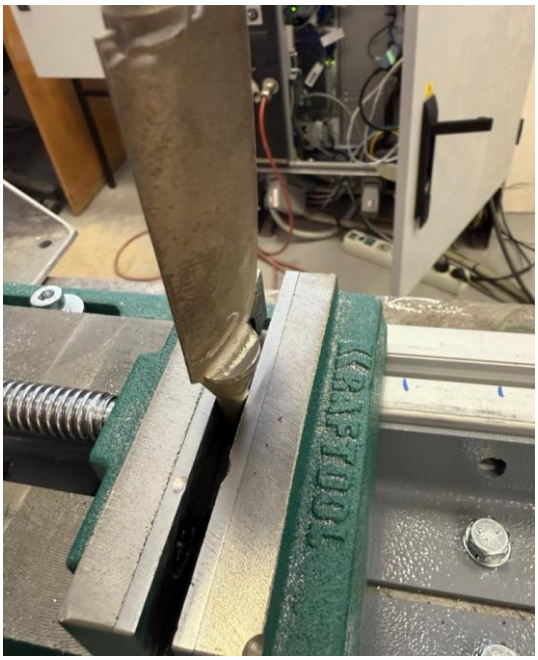


Рисунок 10 – Лопатка после обработки

Так как обрабатываемость сплава ВТ8 значительно хуже чем Д16Т, то любые неровности обрабатываемой поверхности значительно увеличивают силовые факторы в зоне резания. Однако разработанный алгоритм позволяет своевременно идентифицировать превышение допустимой силы резания и скорректировать подачу инструмента (рисунок 11).

В ходе экспериментов удалось достичь шероховатости поверхности в диапазоне R_a 0,8…1,2 мкм, что соответствует техническим требованиям (рисунок 12).

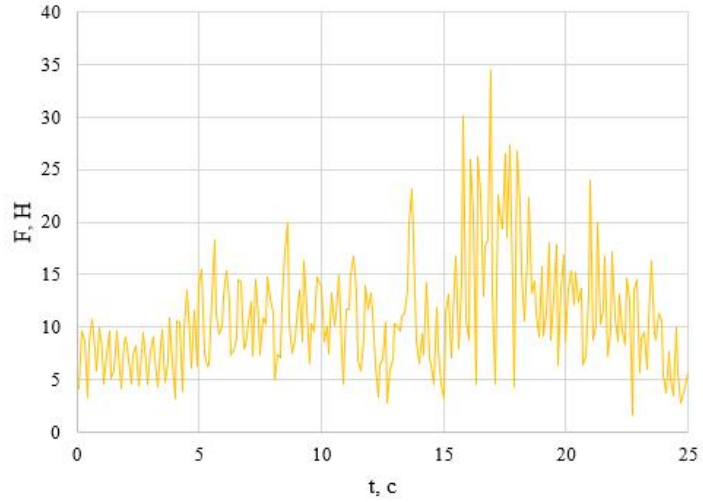


Рисунок 11 – Выводы силомоментного датчика при обработке лопатки

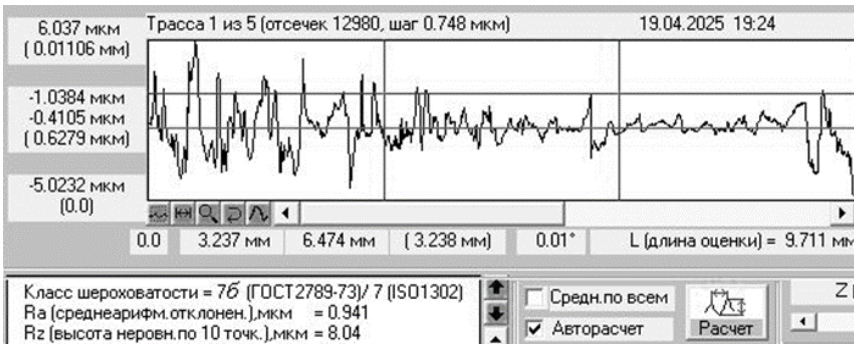


Рисунок 12 – Профилограмма обработанной поверхности лопатки

В четвертой главе представлены результаты экспериментальных исследований по определению зависимости величины шероховатости R_a [мкм] от технологических режимов, проведенные в лаборатории «Средства автоматизации и промышленные роботы» Московского Политеха. В качестве варьируемых факторов были приняты: скорость вращения инструмента [об/мин], подача [мм/мин], глубина [мм], максимальное допустимое усилие F_{max} [Н], минимальное допустимое усилие F_{min} [Н]. Эксперименты проводились на материале Д16Т.

В качестве функции отклика, связывающей рациональный параметр с факторами процесса, были приняты уравнения степенного типа, которые с достаточной точностью связывают рациональные параметры с целевой функцией.

В результате обработки результатов эксперимента были найдены зависимости величины шероховатости поверхности :

$$R_a = 5.43\ \mathrm{V}^{-0.26}\ \mathrm{t}^{0.23}\ F_{max}^{0.29}\ F_{min}^{0.1} \qquad (1)$$

На основе полученного уравнения были построены номограммы (рисунок 13), которые позволяют назначать технологические режимы в зависимости от требований.

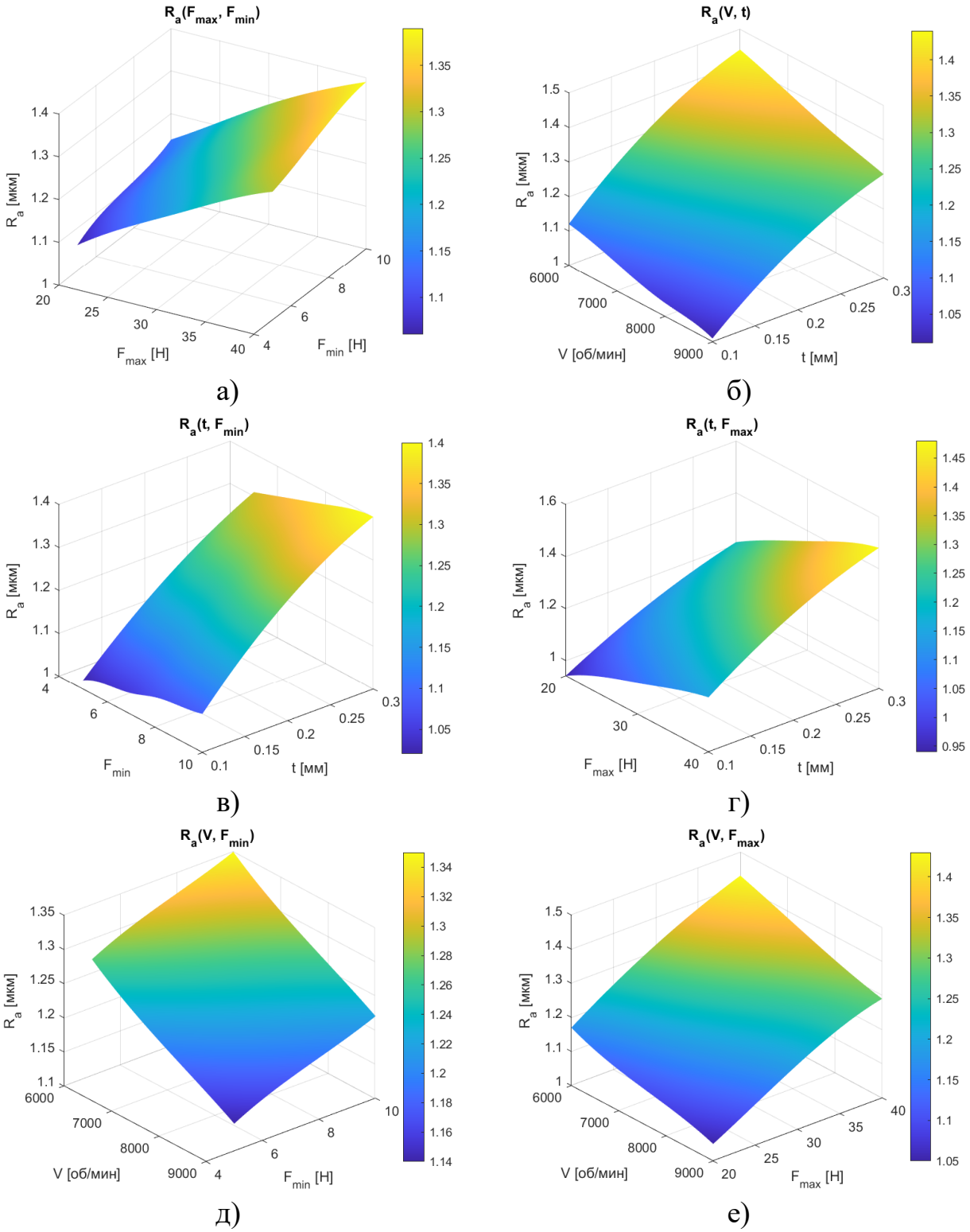


Рисунок 13 – Зависимость шероховатости R_a от парных параметров при поддержании остальных параметров на основном уровне: а) от максимальной и минимальной силы; б) от скорости вращения инструмента и глубины резания; в) от глубины резания и минимальной силы; г) от глубины резания и максимальной силы; д) от скорости вращения инструмента и минимальной силы; е) от скорости вращения инструмента и максимальной силы

Проведенные экспериментальные исследования позволили установить влияние варьируемых параметров на величину R_a. Установлено, что

шероховатость R_a прямо пропорциональна подаче и глубине, величине силовых факторов, а также обратно пропорциональна скорости вращения инструмента.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. В результате проведенного исследования, значимого для предприятий машино- и приборостроения, решены научные и технические задачи, связанные с обеспечением технологической надежности роботизированной механической обработки криволинейных поверхностей.

2. Разработана методика проектирования технологической операции роботизированной обработки на основе учета одноканальной жесткости технологической системы, а также определены значения фактической жесткости манипулятора при различных вылетах выходного звена. Полученные результаты необходимы для разработки алгоритма порогового позиционно-силового управления и обеспечивают возможность управления процессом обработки.

3. Доказана адекватность и эффективность применения алгоритма порогового управления с коррекцией подачи при роботизированной обработке.

4. Доказано снижение сил резания до 50% по сравнению с условиями резания при позиционном управлении.

5. На основе экспериментальных исследований установлено, что алгоритм управления позволяет обеспечить шероховатость поверхности Ra 0.8...1.2 мкм и точность в допуске 0.2 мм.

6. Проведенные эксперименты на промышленной детали (лопатка компрессора ГТД) показали эффективность функционирования алгоритма с обеспечением шероховатости поверхности менее Ra 1 мкм.

7. В результате проведенных исследований установлены экспериментальные взаимосвязи, характеризующие влияние технологических режимов (частоты вращения инструмента, скорости подачи и границ интервала допустимых силовых факторов) на величину шероховатости поверхности. Полученные уравнения регрессии обеспечивают возможность анализа влияния исследуемых факторов на целевую функцию.

8. Установлено существенное снижение величины шероховатости: значение среднего арифметического отклонения профиля уменьшилось с Ra 2,4 мкм до Ra 0,9 мкм, что свидетельствует о обеспечении требуемого качества поверхности.

9. Разработан программный продукт «Программа управления роботизированной отделочной обработкой в условиях неравномерного припуска для обеспечения технологической надежности операции на основе сигналов силомоментного датчика», зарегистрированный в Реестре программ для ЭВМ

(свидетельство № 2025695238 от 10 декабря 2025 г.). Программное обеспечение предназначено для реализации адаптивного управления процессом роботизированной механической обработки криволинейных поверхностей в условиях неравномерного припуска, что позволяет обеспечить технологическую надежность операции.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ АВТОРОМ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Вартанов, М. В. Методы подавления вибраций при роботизированной обработке / М. В. Вартанов, Д. И. Миронов, **А. И. Шварц.** // Станкоинструмент. – 2023. – № 3. – С. 34–41. – DOI: 10.22184/2499-9407.2023.32.3.34.41 (личное участие 35 %)

2. Вартанов, М. В. Технологическое обеспечение качества при роботизированной отделочной обработке на основе средств адаптации / М. В. Вартанов, **А. И. Шварц**, Д. И. Миронов. // Наукоемкие технологии в машиностроении. – 2025. – № 6 (168). – С. 31–38. – DOI: 10.30987/2223-4608-2025-6-31-38. (личное участие 35 %)

3. **Шварц, А. И.** Роботизированная отделочная обработка в условиях неравномерного припуска на основе средств активной адаптации / **А. И. Шварц** // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2025. – № 12. – С. 567–572. – DOI: 10.24412/2071-6168-2025-12-567-568. (личное участие 100 %)

4. Вартанов, М. В. Технологическое обеспечение шероховатости поверхности на роботизированных отделочных операциях / М. В. Вартанов, **А. И. Шварц** // Вестник МГТУ «СТАНКИН». – 2026. – № 1. – С. 66–75. – DOI: 10.47617/2072-3172-2026-1-66. (личное участие 50 %)

ПРОЧИЕ ПУБЛИКАЦИИ

1. Вартанов, М. В. Роботизированное полирование плоских поверхностей с применением нейронных сетей / М. В. Вартанов, А. И. Шварц, Д. И. Миронов. – Текст : непосредственный // Современные тенденции развития инструментальных систем и металлообрабатывающих комплексов : материалы Международной научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2023. – С. 352–358.

2. Вартанов, М. В. Технологическое обеспечение качества роботизированной обработки на основе средств адаптации / М. В. Вартанов, А. И. Шварц. – Текст : непосредственный // Машиностроительные технологические системы : материалы Международной научно-технической конференции. – Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2023. – С. 456–462.

3. Вартанов, М. В. Обеспечение качества поверхности при роботизированной обработке в условиях неравномерного припуска / М. В. Вартанов, А. И. Шварц, Н. Д. Соколов. – Текст : непосредственный // Машиностроительные технологические системы : материалы Международной научно-технической конференции. – Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2025. – С. 523–527.

4. Вартанов, М. В. Технологическое обеспечение роботизированной отделочной обработки криволинейных поверхностей / М. В. Вартанов, А. И. Шварц, Н. Д. Соколов. – Текст : непосредственный // Актуальные проблемы науки и техники : материалы Всероссийской (национальной) научно-практической конференции. – Ростов-на-Дону : Издательский центр ДГТУ, 2025. – С. 736–737.

СВИДЕТЕЛЬСТВО

4. Программа управления роботизированной отделочной обработкой в условиях неравномерного припуска для обеспечения технологической надежности операции на основе сигналов силомоментного датчика/ Вартанов М.В., Шварц А.И.// Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2025695238 от 10.12.2025

Научное издание

Шварц Александр Игоревич

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ ТОЧНОСТИ И ШЕРОХОВАТОСТИ ПРИ РОБОТИЗИРОВАННОЙ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ КРИВОЛИНЕЙНЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НА ОСНОВЕ СРЕДСТВ АДАПТАЦИИ

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук