

На правах рукописи



**Сидорова Алена Владимировна**

**СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА  
ОБРАБОТКИ КРОМОК ДЕТАЛЕЙ С ПРИМЕНЕНИЕМ  
РОБОТОТЕХНИЧЕСКОГО КОМПЛЕКСА**

Специальность 05.02.08 – Технология машиностроения

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Тула – 2021 г.

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет» (ФГБОУ ВО «ИРНИТУ»)

**Научный руководитель:** доктор технических наук, профессор,  
**Пономарев Борис Борисович,**

**Официальные оппоненты:** **Петрешин Дмитрий Иванович,** доктор технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»;

**Дударев Александр Сергеевич,** кандидат технических наук, доцент, ФГБОУ ВО «Пермский национальный исследовательский политехнический университет»

**Ведущая организация:** ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения»

Защита состоится «07» апреля 2021 года в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.271.01, созданного на базе ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» по адресу: 300012, г. Тула, проспект Ленина, д. 92, 9-101.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» и на официальном сайте университета:  
[http://tsu.tula.ru/science/dissertation/diss-212-271-01/Sidorova\\_AV/](http://tsu.tula.ru/science/dissertation/diss-212-271-01/Sidorova_AV/)

Автореферат разослан «12» февраля 2021 года.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Черняев  
Алексей Владимирович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Повышение производительности, снижение трудоемкости и обеспечение безопасности выполнения финишных операций являются актуальными задачами современного машиностроения. К числу таких операций относятся удаление облоя и заусенцев с деталей, зачистка острых кромок, образовавшихся в процессе обработки заготовок и т.д. Особенно актуальна эта проблема для деталей, имеющих сложные контуры и формы с большим количеством колодцев, карманов, полок, ребер и других конструктивных элементов.

### **Актуальность темы.**

Формирование заусенцев является общей проблемой для всех видов обработки: фрезерование, точение, вырубка и литейные процессы. Заусенцы должны быть удалены с целью обеспечения требований техники безопасности и технических условий выполнения последующих технологических операций (поверхностное упрочнение, нанесение покрытий, сборка).

На сегодняшний день размер притупления кромок регламентируется ОСТ 1 00022-80 и варьирует для наружных углов 0,1...0,4 мм, для внутренних 0,2...0,8 мм.

Для снятия заусенцев, облоя и притупления кромок применяется, как правило, ручная слесарная обработка. На сегодняшний день остро стоит вопрос полного замещения такого вида работ. Имеется ряд современных методов, обеспечивающих замену человеческого труда. Перспективным направлением решения является применение промышленных роботов (ПР), имеющих многостепенные манипуляторы и предназначенные для выполнения основных технологических операций механообработки деталей. Преимущество ПР состоит в том, что в отличие от используемых для тех же целей специальных станков роботы менее металлоемки и благодаря многосвязной кинематике позволяют обрабатывать крупногабаритные детали сложной геометрической формы при малом количестве переустановок. Применение ПР имеет большое социальное значение, заключающееся в улучшении условий труда, предотвращении производственного травматизма и профзаболеваний.

Повышение точности исполнения требований к размерам и форме фасок, получаемых при обработке деталей, как и производительности роботизированных финишных операций связано с необходимостью проведения исследований, направленных на совершенствование структур, методов и режимов управления роботом. Таким образом, обоснование оптимальных параметров обработки кромок деталей на робототехническом комплексе, обеспечивающих исполнение требований к размерам и качеству фасок деталей, является актуальной задачей.

**Цель диссертационной работы** технологическое обеспечение заданных параметров формообразования, точности и качества поверхности фаски деталей при обработке с использованием многоосевого промышленного робота.

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

1. Оценить влияние отдельных параметров процесса фрезерования и условий обработки кромок деталей с применением робототехнического комплекса (РТК) на производительность технологического процесса их удаления, размеры и качество поверхности получаемой фаски.

2. Провести экспериментальные исследования влияния режимов обработки на размер фаски и качество поверхности.

3. Разработать эмпирические регрессионные модели, позволяющие описывать влияние режимов обработки на размер фаски и параметры шероховатости обработанных поверхностей.

4. Разработать алгоритмы оптимизации процесса обработки кромок деталей с применением робототехнического комплекса с учётом заданной шероховатости и размера кромки.

5. Разработать программное обеспечение для расчета оптимальных режимов обработки с учетом обеспечения заданного размера фаски и параметров шероховатости поверхности.

6. Разработать и провести апробацию полученной методики.

Потребность в решении перечисленных задач обусловлена запросами производства, что и определяет актуальность представленной работы.

**Объектом исследования** являются технологический процесс обработки, режимы и настроечные параметры, реализуемые в РТК удаления заусенцев и притупления острых кромок после механической обработки деталей.

**Предметом исследования** является закономерность влияния параметров обработки на размер и качество поверхности фаски при фрезеровании кромок деталей с применением РТК.

**Научная новизна:**

Установлено влияние режимов резания и настроечных параметров робототехнического комплекса на размер фаски и параметры шероховатости обработанных поверхностей, на основании чего получена эмпирическая математическая модель, отражающая взаимосвязь настроечных параметров робототехнического комплекса с точностью и производительностью обработки фаски, и их рациональным назначением (п. 3, п. 7 паспорта специальности 05.02.08).

**Практическая значимость работы.**

1. Создан опытный участок и разработана технология выполнения финишных операций с обоснованными настроечными параметрами автоматизированной механической обработки деталей, предназначенных для изделий машиностроения и авиастроения.

2. Разработано программное обеспечение определения оптимальных управляемых параметров процесса обработки кромок с применением РТК. В качестве критерия оптимизации принята точность обработки и параметры качества обработанной поверхности.

3. Предложены технологические рекомендации, которые могут найти широкое применение в промышленности.

**Методология и методы исследования.** Теоретические исследования базируются на научных основах технологии машиностроения и резания материалов, математической статистике и методах планирования эксперимента. Статистические расчеты и планирование проводилось с помощью пакетов Statistica 6.0. Экспериментальные данные получены на современном оборудовании с применением высокоточной измерительной аппаратуры. РТК выполнен на базе промышленного робота Kuka KR210 R2700, исследование шероховатости поверхности осуществлялось с помощью профилометра Taylor Hobson Form Talysurf i200 со специальным программным сопровождением. При разработке программ оптимизации процесса обработки кромок использовано программное обеспечение Microsoft Visual Studio 2017.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты численного и экспериментального исследования влияния параметров обработки на размер фаски и шероховатость поверхности;
2. Экспериментально установленные взаимосвязи и влияние параметров обработки комплекса на размер фаски и шероховатость поверхности кромки;
3. Технологические рекомендации по определению рациональных настроечных параметров обработки в зависимости от заданных размеров фаски и шероховатости поверхности по чертежу.

**Реализация результатов.** Материалы настоящей диссертации получены при проведении исследований в ходе выполнения работ по договору № 389/12 от 15.11.2012, направленных на создание высокотехнологичного производства в рамках инновационного проекта «Автоматизация и повышение эффективности процессов изготовления и подготовки производства изделий авиатехники нового поколения на базе научно-производственной корпорации «Иркут» с научным сопровождением Иркутского государственного технического университета». Договор выполнялся совместно с ПАО «Научно-производственная корпорация «Иркут» и реализован на основании постановления Правительства Российской Федерации от 9 апреля 2010 г. № 218 «О мерах государственной поддержки развития кооперации российских высших учебных заведений и организаций, реализующих комплексные проекты по созданию высокотехнологичного производства».

**Апробация работы.** Основные результаты и положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на IV Международной научно-практической конференции «Системы управления жизненным циклом изделий авиационной техники: актуальные проблемы, исследования, опыт внедрения и перспективы развития» (г. Ульяновск, 16-17 октября 2014 г.); Международном молодежном форуме «Будущее авиации и космонавтики за молодой Россией» в рамках раздела МАКС-2015 (г. Жуковский, МО, 2015 г.); на всероссийской 5-й научно-практической конференции Иркутского авиационного завода «Молодежь. Проекты. Идеи»

(г. Иркутск, Иркутский авиационный завод – филиал ПАО «Корпорация «ИРКУТ», 10–12 ноября 2015 г.); всероссийской научно-практической конференции «Авиамашиностроение и транспорт Сибири» (г. Иркутск, 13-16 апреля 2016 г.); IX Всероссийской научно-практической конференции «Авиамашиностроение и транспорт Сибири» (г. Иркутск, 12-15 апреля 2017 г.); Международной научно-технической конференции «Современные проблемы машиностроения» (г. Томск, 04–06 декабря 2017 г.); X Международной научно-технической конференции «Авиамашиностроение и транспорт Сибири» (г. Иркутск, 21–26 мая 2018 г.).

В полном объеме диссертация докладывалась на расширенном заседании кафедры «Технологии и оборудования машиностроительных производств» Иркутского национального исследовательского технического университета и кафедры «Технология машиностроения» Тульского государственного университета.

**Публикации.** Результаты диссертационной работы отражены в 16 научных работах (общим объемом – 5.8125 п.л., авторский вклад – 2.973 п.л.), из них 7 публикаций – в журналах, рекомендованных ВАК, 3 – в международных изданиях, входящих в реферативные базы данных Scopus и Web of Science, 6 – в материалах конференций различного уровня.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 108 наименований и 4 приложений. Общий объем работы – 158 страниц, включая 15 таблиц и 54 рисунков. Четыре приложения представлены на 33 страницы.

### **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы исследования, сформулирована научная новизна, цель и задачи исследования, практическая значимость работы, определены положения, выносимые на защиту, описана методология и методы исследований.

**В первой главе** представлен анализ различных процессов механизированной финишной обработки деталей, рассмотрено современное оборудование и технологии финишной обработки деталей.

Дан краткий обзор предшествующих работ, выполненных у нас в стране и за рубежом. В области автоматизации процессов финишной обработки с применением робототехнических комплексов в отечественной литературе особый интерес вызывает работа Игнатова Д.А., автор занимался повышением производительности отделочно-зачистных операций на основе дистанционно-автоматического управления технологическими роботами. Из зарубежного опыта наибольший интерес представляют работы Kuoshu Ting, Jayasundaram Pandian, H. Kazerooni, Mohammad Syazwan Bin Omar. Авторы рассматривают процесс снятия заусенцев с использованием специального датчика, отслеживающего неточности геометрии детали.

Процесс финишной обработки деталей промышленными роботами с использованием датчиков контроля силы резания описан в работах J. Norberto Pires, Beom-Sahng Ryuh.

В работах К. М. Murphy, Andrisano Angelo O. рассмотрено программное обеспечение для автоматизированного программирования траектории обработки деталей с помощью роботов.

В современном производстве обработку кромок крупногабаритных деталей сложной формы (длина более 3 м. и перепад высот ребер более 20 мм) производят ручным слесарным инструментом, что не редко приводит к появлению брака, в связи, с чем возникла необходимость замещения ручного труда машинным, в том числе с применением роботов. При этом приходится учитывать, что современный промышленный робот имеет ряд ограничений, таких как зона досягаемости, грузоподъемность, необходимость исключения столкновений, что требует предварительного программирования каждого движения. Несмотря на эти ограничения, применение промышленных роботов в процессах снятия заусенцев и размерного притупления кромок может и должно обеспечить повышение качества и эффективности процесса, чему и посвящено данное исследование.

На сегодняшний день размер притупления кромок варьирует для наружных углов 0,1...0,4 мм, для внутренних 0,2...0,8 мм (рисунок 1).

По ГОСТ 30893.1 – 2002 (ИСО 2768-1 - 89) предусмотрены предельные отклонения притупленных кромок (наружных радиусов скругления и высот фасок):

- $\pm 0,2$  мм для точного (f) и среднего (m) классов точности;
- $\pm 0,4$  мм для грубого (c) и очень грубого (v) классов точности.

По отраслевому стандарту авиационной промышленности ОСТ 1.000.22 - 80 предельные отклонения притупленных кромок составляют  $\pm 0,1$  мм.

Шероховатость поверхности скругленных кромок должна соответствовать требованиям чертежа на обрабатываемые детали (например, для деталей авиационной техники шероховатость обработанных поверхностей должна соответствовать  $Ra \leq 3,2$ ).

На основе анализа результатов, представленных в опубликованных работах, и практического опыта сформулированы цель и задачи диссертационной работы.

**Вторая глава** посвящена вопросам выявления и оценки факторов, влияющих на входные параметры финишной обработки в роботизированном производстве. Разработан перечень деталей с учетом особенностей обработки в условиях робототехнического комплекса и сложности геометрии. На основе перечня выбран материал В95пчТ2 для проведения исследований.

Рассмотрены преимущества применения ПР на операциях финишной обработки для сложных авиационных деталей. В главе сформулированы требования к составу робототехнического комплекса обработки деталей, предназначенного для обработки кромок деталей со сложной геометрией. На

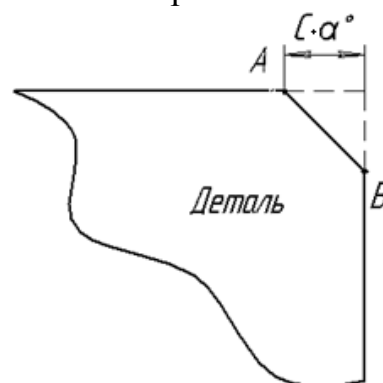


Рисунок 1 – Обозначение размера фаски

рисунке 2 представлена 3D модель спроектированного робототехнического комплекса с указанием компонентов, входящих в его состав.

Проведен анализ инструмента, который показал, что для получения заданного качества обработки целесообразно использовать коническую борфрезу из твердого сплава с 24 зубьями.

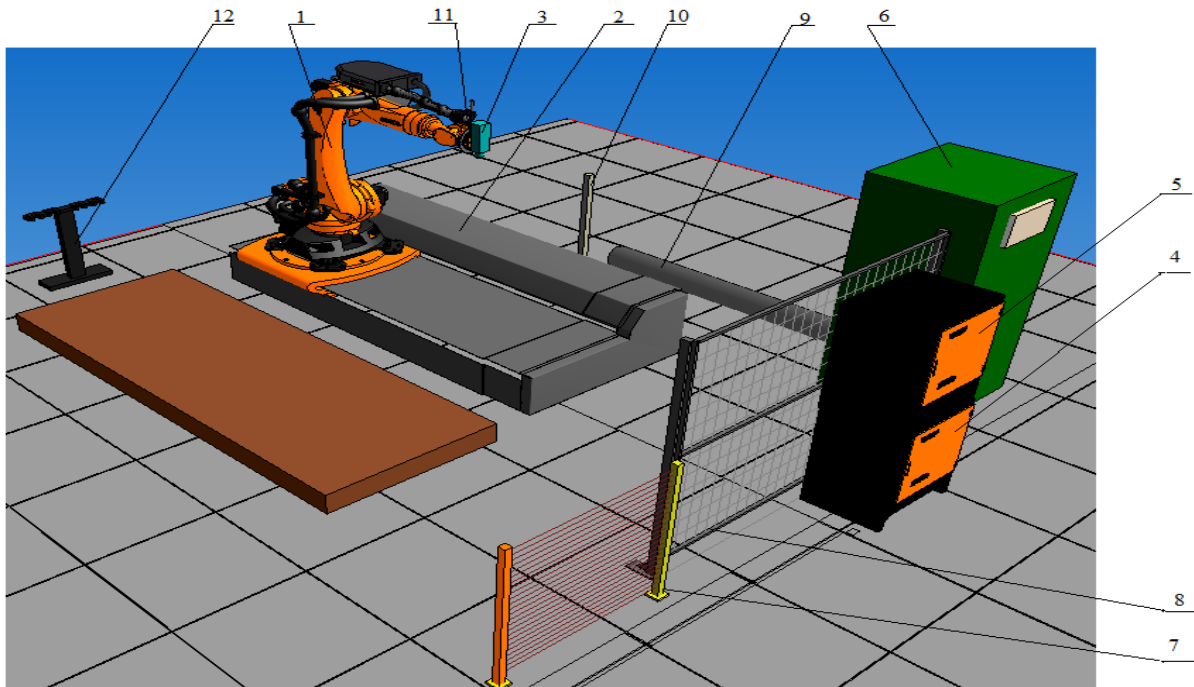


Рисунок 2 – 3D-модель РТК зачистки

- |                                     |                             |
|-------------------------------------|-----------------------------|
| 1- Промышленный робот;              | 7- Фоторелейный барьер;     |
| 2- Линейная направляющая            | 8- Механические ограждения; |
| 3-Электрический шпиндель            | 9- Воздуховод               |
| 4- Контроллер робота                | 10- Стойка для воздуховода  |
| 5- Шкаф управления РТК              | 11- Силомоментный датчик    |
| 6-Вытяжнаяфильтровальная установка; | 12-Магазин инструментов.    |

Описан процесс резания при удалении заусенца. В работе Whitney D.E. получена упрощенная модель для прогноза средней силы резания при фрезеровании, в которой сила резания пропорциональна изменению частоты прохождения зуба. Аналогичная модель, которая утверждает, что сила резания равна пропорционально скорости удаления материала применяется для снятия заусенцев для фаски 45 градусов.

$$P_z = K a^2 S, \quad (1)$$

- где  $P_z$  – результирующая сила резания, Н;  
 $K$  – коэффициент резания, Н/мм<sup>2</sup>;  
 $a$  – ширина резания, мм;  
 $S$  – подача, мм/сек.

На рисунке 3 показаны компоненты силы (действующие на инструмент) и геометрия фаски для фаски 45 градусов.

Анализ процесса с учетом технологических требований выявил необходимость использования в РТК силомоментного датчика. Для настройки

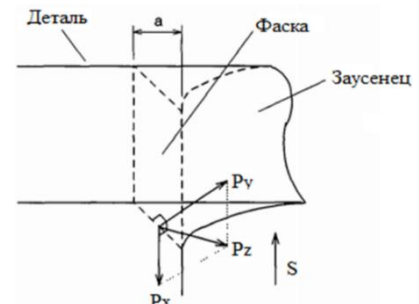


Рисунок 3 - Составляющие силы резания

работы силомоментного



датчика необходимо указать параметры силы удержания (setpoint force  $F$  [N]), направление отслеживания силы (main direction), коэффициент усиления ( $KR$  [(mm/s)/N]).

При этом сила удержания – желаемое или целевое значение для существенной переменной силы или технологического значения системы. Коэффициент усиления – величина в канале коррекции траектории движения робота, оказывающая влияние на скорость коррекции движения робота при разнице между измеренной и заданной силой удержания.

В ходе предварительных испытаний были выявлены факторы, оказывающие наибольшее влияние на процесс финишной обработки кромок деталей на оборудовании РТК:

1. Подача  $S$ , мм/мин.
2. Частота вращения шпинделя  $n$ , мин<sup>-1</sup>.
3. Коэффициент усиления  $KR$ .
4. Сила удержания  $F$ , Н.

Сила удержания, действующая на заготовку, имеет компоненты:  $P_t$  – тангенциальная сила, касательная к детали и  $P_n$  – нормальная сила в направлении нормальном к поверхности детали. Силы резания, сгенерированные на инструменте и измеренные на датчике силы (рисунок 4), имеют противоположные направления.

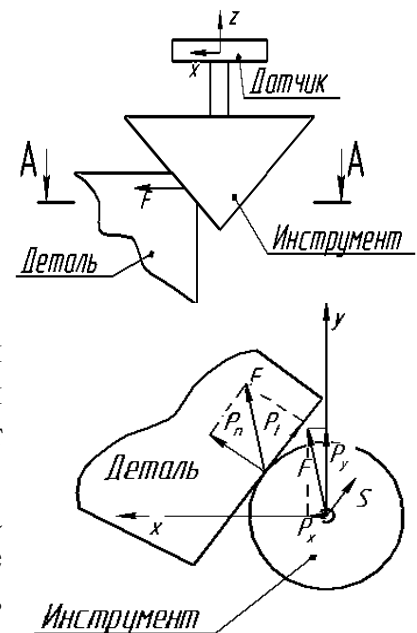


Рисунок 4 – Силы, действующие на деталь

Алгоритм работы силомометного датчика объединяет информацию о силе и крутящем моменте с данными о положении робота, чтобы удовлетворить одновременное позиционирование траектории и силовых ограничений в выбранном направлении системы. Для коррекции траектории необходимо сравнивать показание составляющих сил резания  $P_x$  и  $P_y$  с заданной силой удержания. Заданная сила удержания внесена заранее в контроллер для достижения определенных параметров поверхности детали. Измеренная сила вычитается из заданной силы удержания и генерируется ошибка системы, затем ошибка подается в контроллер, который вносит коррекцию до тех пор, пока ошибка измеренной силы резания и заданной силы удержания не будет равна нулю. Стабильность геометрии и качество поверхности обрабатываемой кромки определяется величиной коэффициента усиления в канале коррекции траектории движения робота  $KR$ , где подача определяется динамическими взаимодействиями и  $KR$ .

При выполнении работы было использовано планирование эксперимента с помощью факторного плана  $3^{**}(k-p)$ , который заключается в рассмотрении трех уровней факторов ( $k-p$ ), где  $k$  – число исследуемых параметров, а  $p$  – число параметров, замещающих взаимодействия. Обосновано применение методов математической статистики, основанных на планировании эксперимента, дисперсионном и регрессионном анализе.

**В третьей главе** представлены результаты экспериментальных исследований по определению зависимости параметра шероховатости и

размера фаски от параметров управления роботом и режимов обработки при выполнении технологической операции финишной обработки.

В качестве рабочего органа для образования фаски был использован шпиндель компании Elettromeccanica Giordano Colombo, при этом в качестве инструмента выбрана борфреза твердосплавная «Практика» тип К зенкер 90 град, 12 x 6 мм, хвостовик 6 мм. В качестве образцов для обработки использовались пластины из сплава алюминия В95пчТ2 с габаритными размерами 150x50x2 мм. Параметры шероховатости были измерены на профилометре контактного типа в продольном и поперечном направлении относительно подачи при обработке. Размер фаски измерялся на профилометре с помощью получения рисунка профиля и измерения расстояния до вершин.

В работе использована модель  $3^{(4-1)}$ , представляющая дробный факторный план эксперимента: для четырех факторов (независимые переменные), с тремя уровнями варьирования, с числом опытов  $N = 27$  при числе повторений  $n = 2$  и числом блоков - 1.

Таблица 1 – Факторы, интервалы, уровни варьирования факторного плана

Уровень факторов	$S$ , мм/мин		$n_{\text{ЭКВ}}$ , мин <sup>-1</sup>		KR		F, Н	
	$x_1$	$\ln x_1$	$x_2$	$\ln x_2$	$x_3$	$\ln x_3$	$x_4$	$\ln x_4$
Верхний (+1)	900	2.708	7500	8.923	0,4	-0.916	1,5	0.405
Основной (0)	600	2.303	5000	8.517	0,3	-1.204	1	0
Нижний (-1)	300	1.609	2500	7.824	0,2	-1.609	0,5	-0.693
Интервал варьирования	300		2500		0,1		0,5	

По итогам факторного эксперимента получены эмпирические формулы зависимостей размера фаски ( $C$ ) и шероховатости поверхности ( $Ra$ ), представленные в формулах (2) и (3):

$$C = 0.337 \cdot S^{0.503 \ln(S) - 2.4682} \cdot n_{\text{ЭКВ}}^{0.3600324} \cdot KR^{-0.00725} \cdot F^{0.2288 - 0.386 \ln(F) - 0.0508 \ln(KR)} \quad (2)$$

$$Ra = e^{33.57} \cdot S^{0.798 \ln(S) + 7.329} \cdot n_{\text{ЭКВ}}^{0.718 \ln(n) - 1.321 \ln(S) - 9.696} \cdot KR^{-0.047} \cdot F^{0.337 \ln(F) - 0.393 \ln(S) + 0.944} \quad (3)$$

Графики поверхностного отклика размера фаски в зависимости от параметров обработки представлены на рисунке 5.

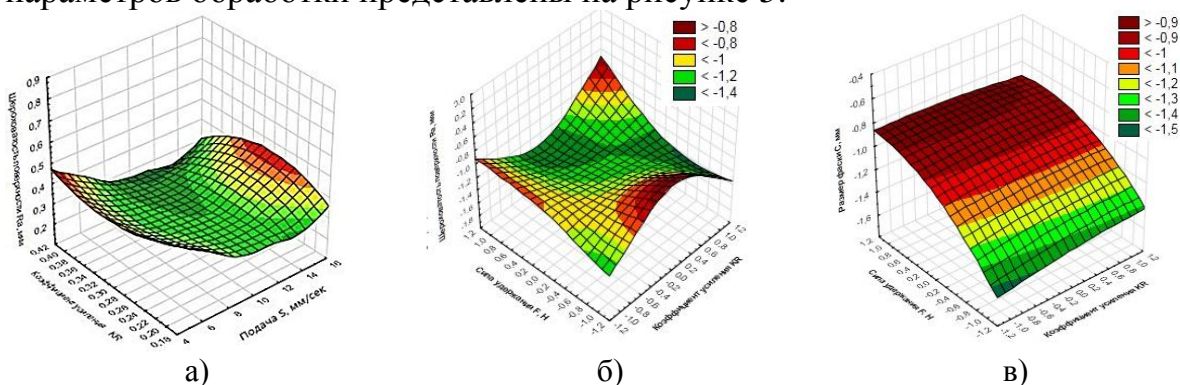


Рисунок 5 – Зависимости размера фаски и шероховатости поверхности от: а) подачи  $S$  и коэффициента усиления  $KR$ ; б) частоты вращения шпинделя  $n$  и силы удержания  $F$ ; в) от коэффициента усиления  $KR$  и силы удержания  $F$

По результатам эксперимента определены вариации с перспективными настройками комплекса, а также область наилучшего функционирования

процесса. Установлены закономерности влияния режимных параметров обработки на результаты процесса образования фаски.

Коэффициент детерминации  $R^2 = 0.95738$ , поэтому, можно считать, что 95,7% изменчивости отклонения размера фаски обусловлено влиянием учтенных факторов, а 4,3% за счет других факторов.

Результаты математической модели качественно соответствуют экспериментальным данным, сходимость среднеквадратичного отклонения результатов математической модели от экспериментальных данных составляет: для размера фаски 84,6%, для шероховатости поверхности 79,2%, что позволяет сделать вывод о достаточной точности расчетов для применения их в производственных условиях.

Также проведены экспериментальные исследования качества обработки криволинейных кромок на образцах из алюминиевого сплава.

В ходе лабораторных испытаний обработки криволинейных участков управляемые параметры варьировались в следующих пределах: коэффициент усиления  $KR$  от 0,2 до 0,4 (мм/сек)/Н с шагом 0,1; частота вращения шпинделя от  $1000 \text{ мин}^{-1}$  до  $16000 \text{ мин}^{-1}$  с шагом  $2500 \text{ мин}^{-1}$ , подача от 300 мм/мин до 1200 мм/мин с шагом 300 мм/мин и сила удержания от 0,5 Н до 2 Н с шагом 0,5 Н. В качестве наблюдаемых величин были приняты размер фаски  $C$  и параметр шероховатости поверхности  $R_a$ . На рисунке 6 показаны результаты обработки криволинейных участков с разным радиусом кривизны.

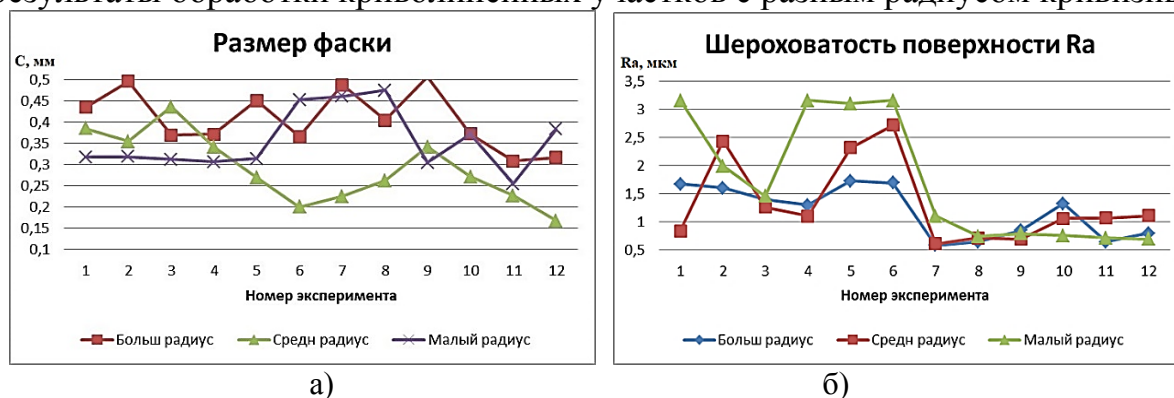


Рисунок 6 – Результаты обработки криволинейных участков а) размер фаски; б) шероховатость поверхности

**В четвертой главе** представлена разработанная на основе проведенного комплекса теоретических и экспериментальных исследований система определения оптимальных режимных параметров и условий управления обработкой деталей на технологическом оборудовании РТК, включающая входные параметры, описание пространства состояний и выходных параметров.

В работе проведена оптимизация по критерию точности обработки и параметрам качества поверхностного слоя.

На основании экспериментальных данных установлено, что значения размера фаски изменяются в диапазоне от 0,09 до 0,6 мм (рисунок 7), что удовлетворяет требованиям ГОСТ 30893.1 – 2002 для точного и среднего класса точности. По отраслевому стандарту авиационной промышленности

ОСТ 1.000.22 - 80 предельные отклонения притупленных кромок для размеров фасок свыше 0,1 до 0,3 мм составляют  $\pm 0,1$  мм, для фасок от 0,3 до 0,5 мм  $\pm 0,2$  мм.

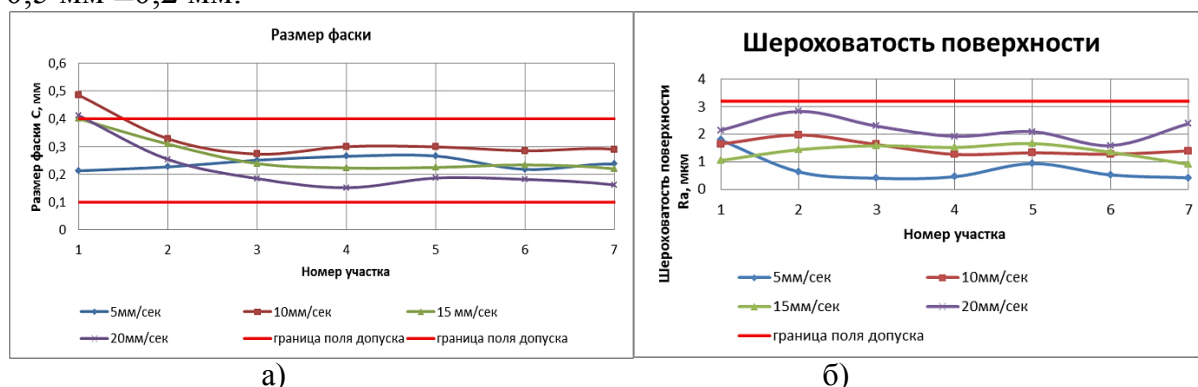


Рисунок 7 – Результаты экспериментальных данных в пределах допуска для а) размер фаски  $C$ , мм, б) шероховатости поверхности  $R_a$ , мкм

Соответствие исполнения размеров фаски и параметров шероховатости требованиям конструкторской документации являются основными критериями при оптимизации управляемых параметров процесса обработки кромок деталей.

Управляемые параметры обработки, обеспечивающие заданные требования к микрогеометрии поверхностного слоя и точности образования кромки, применительно к регулируемому процессу в общем случае могут быть представлены следующим образом:

$$(R_a, C) = f(S, n, F, KR), \quad (4)$$

где  $S$  – подача мм/мин,  $n$  – частота вращения шпинделя  $\text{мин}^{-1}$ ;  $F$  – сила удержания Н;  $KR$  – коэффициент усиления.

Применительно к процессу притупления острых кромок на деталях после механической обработки и образования размерной фаски таким показателем, определяющим качество, принят  $R_{a0}$  – заданное среднее арифметическое отклонение профиля шероховатости поверхности, а точности  $C_0$  – заданная величина размера фаски. Поскольку эти показатели разноразмерны, в работе использованы их относительные, а не абсолютные отклонения от оптимальных значений. В этом случае целевая функция оптимизации имеет вид:

$$f(R_a, C) = \left( \frac{R_a - R_{a0}}{R_{a0}} \right)^2 + \left( \frac{C - C_0}{C_0} \right)^2, \quad (5)$$

где  $R_a, C$  – текущие значения шероховатости и размера фаски;  $R_{a0}, C_0$  – заданные значения шероховатости и размера фаски.

На рисунке 8 представлена блок-схема алгоритма определения оптимальных параметров финишной обработки по критерию точности обработки и параметру качества поверхностного слоя, данный алгоритм

может быть применен при различных траекториях обработки. Для корректной работы необходимо ввести данные, предъявляемые к качеству кромки детали по чертежу.

Для применения в практических целях разработано программное обеспечение и технологические рекомендации. Программный модуль разработан на платформе Microsoft Visual Studio 2017. Программа позволяет подбирать оптимальные параметры обработки ( $S$ ,  $n$ ,  $KR$ ,  $F$ ), исходя из размеров кромки и параметров шероховатости, заданных в чертеже. Для удобства пользователя интерфейс содержит единицы измерения, используемые в настройках робототехнического комплекса.

На основе экспериментальных данных и эмпирических зависимостей сформулированы технологические рекомендации, позволяющие технологу обоснованно принимать решение на стадии проектирования технологического процесса финишной обработки.

Для обеспечения требуемого размера фаски 0,1...0,4 мм на прямолинейных участках и криволинейных участках, с различным радиусом скругления (не менее 16 мм, от 16 до 8 мм, до 8 мм) деталей из алюминиевых сплавов рекомендуется применять сочетание параметров, представленных в таблице 2:

Таблица 2 – Рекомендуемые управляемые параметры обработки при различных видах траектории движения инструмента

Вид траектории	Подача $S$ , мм/с	Частота вращения шпинделя $n_{\text{экв}}$ , мин <sup>-1</sup>	Коэффициент усиления $KR$	Сила удержания $F$ , Н
Прямолинейные участки	20	2500-16000	0,3	1
Криволинейных участках $R > \varnothing 16$ мм	20	7500	0,3	1
Криволинейных участках $R$ от $\varnothing 8$ мм до $\varnothing 16$ мм	10	5000	0,2	1
Криволинейных участках $R < \varnothing 8$ мм	5-3	2000	0,1	0,5

По сборнику «Общемашиностроительные нормативы времени на слесарную обработку деталей и слесарно-сборочные работы по сборке машин» установлен норматив времени на ручную зачистку заусенцев и притупление острых кромок по контуру на плоских и цилиндрических

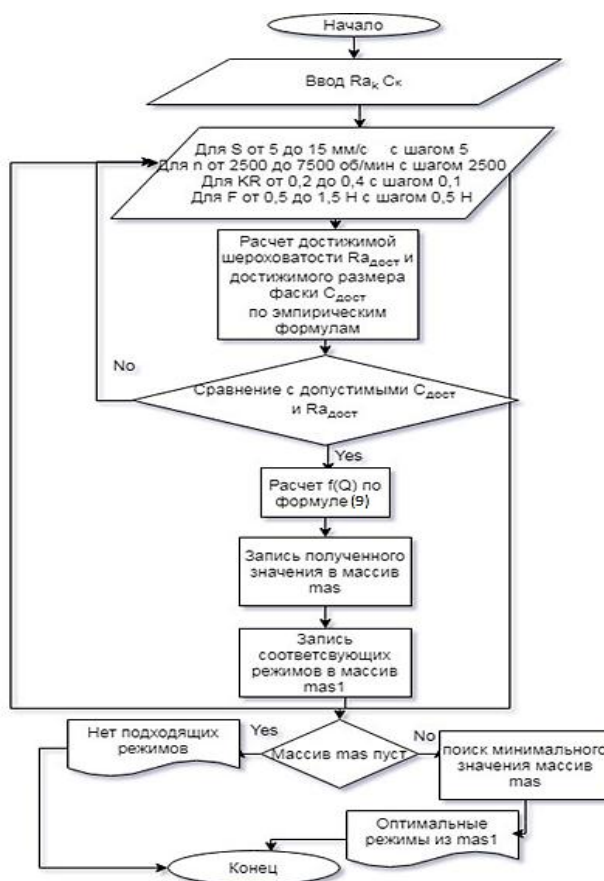


Рисунок 8 – Блок-схема алгоритма определения управляющих параметров

деталей пневматической бормашиной по прямолинейному контуру 6 мм/с., по криволинейному 5 мм/с., что в 2 раза ниже рекомендуемой подачи при обработке кромок на робототехническом комплексе.

Для подтверждения экономической целесообразности применения робототехнического комплекса при обработке кромок деталей проведен сравнительный расчет на основе сведений о стоимости станко-часа и робот-часа. Из расчета следует, что применение промышленного робота на операциях обработки кромок позволяет в 4 раза уменьшить финансовые затраты по сравнению с обработкой на станке.

**В заключении** приводятся основные результаты диссертационной работы.

**В приложении** содержатся протоколы измерений, текст программы обработки и акт внедрения результатов в учебный процесс.

### **ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ**

В работе решена актуальная задача обоснования оптимальных параметров обработки кромок деталей на робототехническом комплексе, обеспечивающих исполнение требований к размерам и качеству фасок деталей.

В процессе теоретических и экспериментальных исследований получены следующие основные результаты и выводы:

1. В результате проведенного анализа выявлены закономерности, устанавливающие влияние входных воздействий на контролируемые параметры обработки кромок деталей на оборудовании робототехнического комплекса. Установлены основные факторы, оказывающие наибольшее влияние на процесс обработки кромок деталей в условиях РТК: подача ( $S$ , мм/мин), частота вращения шпинделя ( $n$ , мин<sup>-1</sup>), коэффициент усиления ( $KR$ ) и сила удержания ( $F$ , Н).

2. Проведены экспериментальные исследования, показывающие влияние режимных и настроечных параметров автоматизированной технологической системы обработки на размер фаски и шероховатость поверхности  $R_a$ , получаемых после фрезерования кромок деталей. Установлено: а) увеличение подачи изменяет шероховатость поверхности  $R_a$  до 0,3 мкм и не приводит к неуправляемому изменению размера фаски за установленные пределы 0,1-0,4 мм; б) с увеличением частоты вращения шпинделя повышается качество поверхности  $R_a$  до 0,2 мкм, но изменяется размер фаски от 0,29 до 0,42 мм; в) коэффициент  $KR$  оказывает существенное влияние только на изменение качества поверхности  $R_a$  с до 0,3 мкм; г) при снижении  $F$  от 1,5 до 0,5 Н удается достигать размера фаски в установленных пределах 0,1-0,4 мм.

3. На основании экспериментальных данных установлено, что значения размера фаски изменяются в диапазоне от 0,09 до 0,6 мм, что удовлетворяет требованиям для точного и среднего класса точности. По результатам проведенных исследований разработаны технологические рекомендации обработки кромок деталей с использованием РТК, которые могут найти широкое применение в различных отраслях промышленности.

4. Разработаны математические модели расчета размера фаски и шероховатости поверхности в зависимости от управляемых технологических факторов, включая режимы резания и настроечные параметры робототехнического комплекса. Полученные модели позволяют сократить сроки технологической подготовки производства и обоснованно назначать режимы резания в зависимости от требований к шероховатости поверхности  $R_a$  и размера фаски.

5. Разработан алгоритм определения оптимальных сочетаний входных параметров управления процессом, обеспечивающих стабильность показателей качества поверхности обработанной детали, установленных конструкторско-технологической документацией.

6. Разработано программное обеспечение расчета оптимальных управляемых параметров работы оборудования РТК обработки кромок, обеспечивающих заданные параметры точности размера фаски и шероховатости обработанной поверхности по чертежу. Разработанное программное обеспечение позволило автоматизировать процесс расчета параметров обработки и исключить ошибки при проектировании.

7. Установлено, что обработка кромок на робототехническом комплексе увеличивает производительность на 50% по сравнению с ручной обработкой при сохранении высокого качества обработанной поверхности. Применение промышленного робота на операциях обработки кромок позволяет в 4 раза уменьшить денежные затраты по сравнению с обработкой на станке, при стоимости ручной обработки 500 руб/час обработка на роботе проходит точки безубыточно.

8. В результате работы исключен брак изделий из-за человеческого фактора, повышена точность и получаемое качество поверхности фаски деталей при обработке с использованием промышленного робота, также применение промышленного робота позволило снизить трудоемкость операций обработки кромок деталей в 2-3 раза.

9. Разработанные расчетные методики, алгоритмы и основные результаты диссертационной работы получены в процессе выполнения комплексного проекта по разработке и внедрению технологии обработки деталей среднемагистрального самолета МС-21 и применены в учебном процессе ФГБОУ ВО ИРНИТУ.

#### **СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

##### **В рецензируемых научных изданиях, рекомендованных ВАК РФ:**

1. **Иванова А.В.** Робототехнический комплекс удаления заусенцев после фрезерования деталей / **Иванова А.В.**, Пономарев Б.Б., Савилов А.В., Чапышев А.П. // Вестник ИрГТУ. – 2013. – № 11 (82). – С. 49-53.

2. Чапышев А.П. Технологические возможности процессов механизированной финишной обработки деталей/ Чапышев А.П., **Иванова А.В.**, Крючкин А.В. // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. –2013. Т. 15. № 6-2. С. 533-537.

3. Чапышев А.П. Технологические возможности процессов механизированной финишной обработки деталей с применением автоматических стационарных установок / Чапышев А.П., **Иванова А.В.** // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. –2014. Т. 16. № 1-5. С. 1627-1634.

4. Беломестных А.С. Исследование влияния коэффициента усиления в канале управления скоростью движения робота на технологические свойства робототехнического комплекса механической обработки кромок деталей / Беломестных А.С., **Иванова А.В.**, Чапышев А.П. // Вестник ИрГТУ. – 2015. – № 7 (102). – С. 39-47.

5. Семёнов Е.Н. Эффективное зонирование рабочего пространства промышленного робота KUKA KR210 R2700 extra / Семёнов Е.Н., **Сидорова А.В.**, Беломестных А.С., Чапышев А.П. // Вестник ИрГТУ. –2015. № 12 (107). С. 86-96.

6. Чашин Н.С. Исследование технологии обработки отверстий малых диаметров в полимерном композиционном материале на робототехническом комплексе / Чашин Н.С., Иванов Ю.Н., **Сидорова А.В.**, Семенов Е.Н., Стуров А.А. // Вестник ИргТУ. – 2015. –Т. 21. № 6 (125). С. 39-48.

7. **Сидорова А.В.** Определение оптимального сочетания параметров управления промышленным роботом в робототехническом комплексе обработки кромок деталей / **Сидорова А.В.**, Пономарев Б.Б. // Вестник Иркутского государственного технического университета. –2019. –Т. 23. № 4. С. 723–730.

**В международных изданиях, включенных в Scopus и Web of Science:**

8. **Ivanova A.V.** Manufacturing capability of the robotic complex machining edge details / **Ivanova A.**, Belomestnyh A., Semenov E., Ponomarev B. // International Journal of Engineering and Technology. –2015. Т. 7. № 5. С. 1774-1780.

9. **Sidorova A.V.** Robotic edge machining using elastic abrasive tool / **Sidorova A.V.**, Semyonov E.N., Belomestnykh A.S. // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering 11. Сер. "International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems 2017 - Simulation and Automation of Production Engineering". –2018. С. 022097.

10. Belomesnykh A.S. Robot-assisted edge machining using special tooling / Belomesnykh A.S., **Sidorova A.V.**, Chapyshev A.P., Semyonov E.N. // Proceedings of the International Conference "Aviamechanical engineering and transport" (AVENT 2018). -2018. С. 40-43.

**В прочих изданиях:**

11. Чапышев А.П. Технологические возможности процессов механизированной финишной обработки деталей с применением автоматических стационарных установок / Чапышев А.П., **Иванова А.В.** // Статьи и тезисы докладов IV Международной научно-практической конференции «Системы управления жизненным циклом изделий авиационной техники: актуальные проблемы, исследования, опыт внедрения и перспективы развития». –2014. С. 347-348.

12. Semyonov E.N. Accuracy assessment of Kuka KR210 R2700 extra industrial robot / Semyonov E.N., **Sidorova A.V.**, Pashkov A.E., Belomestnykh A.S. // International Journal of Engineering and Technology. –2016. Т. 16. № 1. С. 19-25.

13. Семенов Е.Н. Исследование частотных характеристик робота Kuka KR210 R2700 extra / Семенов Е.Н., **Сидорова А.В.**, Беломестных А.С. // В сборнике: Авиамашиностроение и транспорт Сибири всероссийской молодежной научно-практической конференции. 2016. С. 252-257.

14. **Сидорова А.В.** Исследование обработки отверстий ПКМ на РТК, дефект отклонения от круглости / **Сидорова А.В.** // В сборнике: Авиамашиностроение и транспорт Сибири Сборник статей всероссийской молодежной научно-практической конференции. 2016. С. 258-262.

15. **Сидорова А.В.** Модель управления точностью обработки на операции фрезерования кромок на РТК / **Сидорова А.В.** // Сборник статей IX Всероссийской научно-практической конференции «Авиамашиностроение и транспорт Сибири. ИРНИТУ. –2017. С. 246-250.

16. Лебедева М.Е. Применение промышленных роботов для автоматизации производства / Лебедева М.Е., **Сидорова А.В.** // Конференция авиамашиностроения и транспорта Сибири 2020. С. 50-55.

Подписано в печать

Формат бумаги 70x100 1/16. Бумага типограф. №2

Офсетная печать. Усл. печ. л. 1,1. Усл. кр. отт. 1,2. Уч. изд. л. 1,0. Тираж 100 экз.

Тульский государственный университет. 300012, г. Тула, просп. Ленина, 92

Издательство ТулГУ. 300012, г. Тула, просп. Ленина, 95