

На правах рукописи

Тивирев Евгений Геннадьевич

**ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ
КОНЦЕВОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ КОРПУСОВ
СБОРНОГО ДЕРЕВОРЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА
ИЗ ВЫСОКОПРОЧНОГО АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА**

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

Автореферат диссертации на соискание
ученой степени кандидата технических наук



Москва, 2021

Работа выполнена в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор

Маслов Андрей Руффович

Официальные оппоненты: **Истоцкий Владислав Владимирович**

доктор технических наук,

генеральный директор

ООО НПП «РИТ-Инжиниринг»

Зайцев Алексей Михайлович

кандидат технических наук,

главный конструктор, начальник отдела

ЗАО «ЗЭМ РКК «Энергия» им. С.П. Королева»

Ведущая организация: **ФГУП «НПО «Техномаш»**

Защита состоится «___» _____ 2021 г. в _____ на заседании диссертационного совета Д 212.141.06 в Московском государственном техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва, 2-я Бауманская ул., д. 5, стр.1.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью, просим направлять по вышеуказанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана и на сайте www.bmstu.ru.

Телефон для справок 8(499)267-09-63

Автореферат разослан «___» _____ 20 г.

Ученый секретарь Диссертационного совета,
к.т.н., доцент



Богданов А.В.

Актуальность работы. В рамках национальной цели «Комфортная и безопасная среда для жизни» намечено увеличение объема жилищного строительства до 120 млн м³ в год. По одному из направлений этой государственной проблемы необходимо увеличить производство современных оконных рам для строительства зданий различного назначения, в том числе за счет роста выпуска высококачественного отечественного дереворежущего инструмента.

Одним из путей совершенствования этого инструмента является замена его стальных корпусов корпусами из высокопрочных алюминиевых сплавов, что обеспечивает обработку древесины с более высокими частотами вращения шпинделей дереворежущих станков. Однако при обработке резанием облегченных корпусов возникает ряд проблем, поскольку в объеме штучного времени их изготовления до 50 % занимает концевое фрезерование, производительность которого в значительной степени определяет объемы выпуска дереворежущего инструмента. В то же время особенности концевого фрезерования заготовок корпусов из высокопрочных алюминиевых сплавов остаются малоизученными, практический опыт их изготовления обобщен недостаточно. Это делает актуальными исследования процесса концевого фрезерования корпусных деталей из высокопрочных алюминиевых сплавов и его инструментальных систем, позволяющих повысить производительность концевого фрезерования корпусов дереворежущего инструмента из высокопрочного алюминиевого сплава.

Цель работы — повышение производительности концевого фрезерования корпусов сборного дереворежущего инструмента из высокопрочного алюминиевого сплава В95Т1.

Основные задачи исследования:

1. Выполнить анализ существующих методов обеспечения высокой производительности концевого фрезерования и моделей, связывающих параметры качества обрабатываемых поверхностей с параметрами инструментальных систем многоцелевых станков с ЧПУ.

2. Исследовать характеристики инструментальных систем «конец шпинделя станка — средство закрепления концевой фрезы (патрон) — концевая фреза» с целью определить взаимосвязь их параметров с параметрами процесса фрезерования.

3. Разработать комплексную методику экспериментальных исследований с целью выявить вклад каждой составляющей инструментальной системы в погрешность обработки, исследовать процесс концевого фрезерования и найти пути совершенствования конструкции концевых фрез.

4. Обосновать наиболее рациональные конструкции концевых фрез и средств их закрепления, разработать рекомендации и повысить производи-

тельность концевой фрезерования корпусов дереворежущего инструмента из высокопрочного алюминиевого сплава.

Объект исследования — инструментальные системы в процессе концевой фрезерования заготовок из высокопрочного алюминиевого сплава В95Т1 на многоцелевом станке с ЧПУ.

Предметная область — конструктивные решения по концевым цельным твердосплавным фрезам и средствам их закрепления в шпинделе, процесс фрезерования и технологический процесс обработки корпусов сборных деревообрабатывающих фрез на многоцелевом станке с ЧПУ.

Научная новизна работы заключается в следующем:

1. Разработана комплексная методика экспериментальных исследований концевой фрезерования, позволяющая выявить вклад каждой составляющей инструментальной системы в погрешность обработки корпусных деталей, обосновать конструктивные параметры инструмента и рекомендации по повышению точности и производительности обработки.

2. Построены зависимости упругих изгибных деформаций инструментальной системы «конец шпинделя многоцелевого станка — средство закрепления — концевая фреза».

3. Получены зависимости составляющих силы резания от конструктивных параметров концевых цельных твердосплавных фрез, средств их закрепления и факторов режимов резания при концевом фрезеровании заготовок из сплава В95Т1.

Методы исследования. Теоретические расчеты выполнены с использованием теорий контактной жесткости машин и резания материалов. Экспериментальные исследования выполнены на аттестованном 5-координатном многоцелевом станке с ЧПУ мод. 528S швейцарской фирмы Willemin-Macodel, имеющем погрешность $\pm 0,1$ мкм перемещений стойки станка по осям Z , X и Y и точность $\pm 0,001$ углового градуса поворота шпинделя вокруг горизонтальной оси по координате C . Использован встроенный в станок динамометр Kistler 9257B с лицензионным комплектом регистрирующей аппаратуры и программным обеспечением обработки динамометрической информации DynoWare. Геометрические параметры концевых фрез измерены на установке HELICHECK PLUS.

Практическая значимость. Разработаны рекомендации по повышению производительности концевой фрезерования корпусов из высокопрочных алюминиевых сплавов и подготовлено учебное пособие «Зажимные устройства технологической оснастки», которое используется в учебном процессе.

Основные положения, выносимые на защиту:

1. Разработанная комплексная методика выявления вклада каждой составляющей инструментальной системы «конец шпинделя многоцелевого стан-

ка — средство закрепления — концевая фреза» в погрешность обработки и способов совершенствования конструкций концевых фрез.

2. Полученные экспериментальные и расчетные зависимости упругих изгибных и контактных деформаций инструментальных систем от изменяемых конструктивных параметров зажимных патронов и концевых цельных твердосплавных фрез.

3. Полученные зависимости составляющих силы резания от конструктивных параметров концевых цельных твердосплавных фрез, глубины резания и подачи при концевом фрезеровании заготовок из сплава В95Т1.

4. Полученные экспериментальные зависимости параметров шероховатости и размеров обработанных поверхностей от факторов процесса резания, конструктивных параметров зажимных патронов и концевых цельных твердосплавных фрез при концевом фрезеровании заготовок из сплава В95Т1.

Достоверность результатов подтверждается корректным применением методов математической статистики при определении силовых характеристик процесса концевой фрезерования, достаточной репрезентативностью статистических выборок и соответствием результатов теоретических и экспериментальных исследований.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы были доложены на XXII Международной научно-технической конференции «Проблемы исследования и проектирования машин». Пенза, 2019; Научно-технической конференции «Академические чтения по космонавтике (Королевские чтения)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана). М., 2020; Всероссийской научно-методической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Н.П. Малевского (МГТУ им. Н.Э. Баумана). М., 2020; Всероссийской научно-технической конференции «Станкостроение и инновационное машиностроение. Проблемы и точки роста» (Уфимский государственный авиационный технологический университет). Уфа, 2020; XV Международной научно-технической конференции «Прогрессивные технологии в современном машиностроении». Пенза, 2020; XIII Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России» (МГТУ им. Н.Э. Баумана). М., 2020. Основные разделы диссертации были представлены в докладах на научных семинарах кафедры инструментальной техники и технологий МГТУ им. Н.Э. Баумана в 2019–2020 гг.

Публикации. По материалам диссертации опубликованы 9 научных работ, в том числе 4 работы в изданиях, входящих в перечень ВАК РФ, из них 2 патента на полезные модели, общий объем 2,91 п.л.

Личный вклад. Все результаты диссертационной работы получены лично автором и при его непосредственном участии в результате проведения экс-

периментальных и расчетных работ. Во всех необходимых случаях заимствования результатов в диссертации приведены ссылки на литературные источники.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, шести глав, общих выводов и заключения, списка литературы и приложения. Объем работы: основной текст, содержащий 148 страниц, включая 95 рисунков, 46 таблиц, 4 приложения и список литературы из 80 наименований.

Содержание работы

Во введении обосновывается актуальность решаемых научно-технических задач, формулируются цель и задачи исследования, научная новизна и практическая значимость предлагаемых решений.

В Главе 1 изложены результаты аналитического обзора литературных источников по теме диссертации, который включает в себя анализ работ, посвященных: а) вопросам повышения производительности концевой фрезерования, теоретическим и экспериментальным исследованиям в области силовых характеристик процесса концевой фрезерования; б) разработке моделей инструментальных систем (ИС), включающих концевые фрезы и средства их закрепления, установленные в шпинделях многоцелевых станков; в) аналитическим методам расчета упругих деформаций концевых фрез.

На сегодняшний день существует несколько методов обеспечения высокой производительности концевой фрезерования, в разработку которых значительный вклад внесли В.Ф. Бобров, В.Ф. Безъязычный, Г.И. Грановский, С.Н. Григорьев, С.В. Грубый, В.Д. Гурин, А.Е. Древаль, Н.Н. Зорев, В.В. Истоцкий, В.С. Кушнер, А.А. Москвитин, Ю.Е. Петухов, А.Н. Резников, А.М. Розенберг, Ю.А. Розенберг, С.С. Силин и др.

Установлено, что одним из направлений повышения производительности концевой фрезерования является повышение точности и жесткости ИС многоцелевых станков с ЧПУ, включающих «конец шпинделя станка — средство закрепления концевой фрезы (зажимной патрон) — концевая фреза», за счет существенного изменения конструктивных параметров фрез и патронов относительно принятых в стандартах и справочных изданиях.

Однако данных в области изучения влияния конструктивных параметров концевых фрез и средств их закрепления на производительность обработки изделий из высокопрочных алюминиевых сплавов на станках с ЧПУ для решения выявленной актуальной научно-технической задачи недостаточно.

Не выявлено комплексных методик исследований ИС, позволяющих определить вклад каждой составляющей инструментальной системы в погрешность обработки и найти пути совершенствования конструкций концевых фрез.

В Главе 2 проведено исследование расчетных моделей типовых ИС, включающих переднюю часть шпинделя высокоточного многоцелевого станка, установленное в нем средство закрепления фрезы с цилиндрическим хвостовиком и закрепленную в нем концевую фрезу.

Для оценки характеристик средств закрепления концевых фрез, таких как цанговый и гидравлический патроны, измеряли податливость ИС, используя перемещение стойки многоцелевого станка мод. 528S со шпиндельной бабкой с точностью 0,1 мкм относительно динамометра по схеме на Рис. 1. Связь перемещений со статической нагружающей силой представлена на Рис. 2.

Правильность выбранных методик расчетов подтвердило совпадение расчетных ($0,078 \text{ мкм} \cdot \text{Н}^{-1}$) и экспериментальных ($0,081 \text{ мкм} \cdot \text{Н}^{-1}$) значений податливости ИС.

Рис. 1. Схема измерения податливости закрепления фрезы:

1 — шпиндель; 2 — исследуемый патрон; 3 — фреза; 4 — тиски; 5 — динамометр Kistler 9257B; 6 — брусок; МУП — многоканальный усилитель-преобразователь Kistler 5070A; МФДК — многофункциональный диагностический комплекс; ПК — персональный компьютер

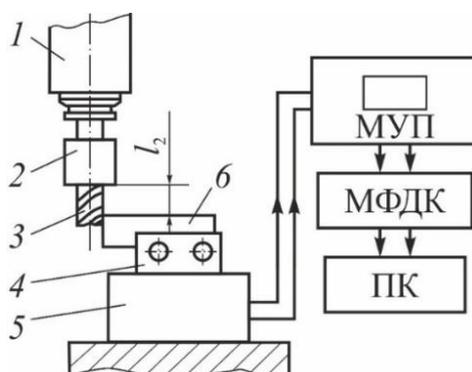
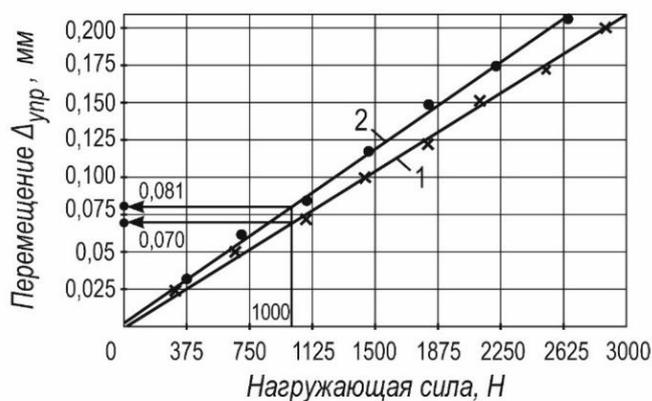


Рис. 2. Связь перемещения $\Delta_{\text{упр}}$ ИС со статической нагружающей силой:

1 — гидравлический патрон;
2 — цанговый патрон



Исследованы взаимосвязи параметров ИС с факторами процесса концевое фрезерования по схеме на Рис. 3.

Получены данные о составляющих P_y , P_z и P_x силы резания в станочной системе координат, об отклонениях размеров уступов шириной $B = 24 \text{ мм}$ с глубиной резания $t = 3,4 \dots 8,0 \text{ мм}$ и параметрах шероховатости обработанных поверхностей при концевом фрезерования острозаточенными и изношенными стандартными трехзубыми концевыми фрезами диаметром 12 мм. Результаты

исследований представлены на Рис. 4–6, где каждая точка усреднена по трем измерениям.

Рис. 3. Схема фрезерования: 1 — заготовка; 2 — динамометр; 3 — концевая фреза; 4 — средство закрепления фрезы; 5 — шпиндель станка

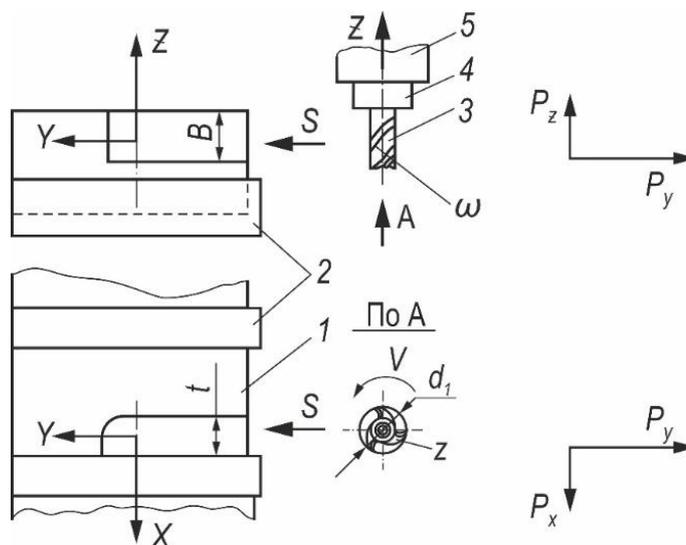


Рис. 4. Зависимости составляющей P_y силы резания от режимов фрезерования (верхняя строка — значения подачи на оборот, мм/об; нижняя строка — глубина резания, мм):
 —●— фрезерование острозаточенной фрезой;
 —×— фрезерование изношенной стандартной фрезой

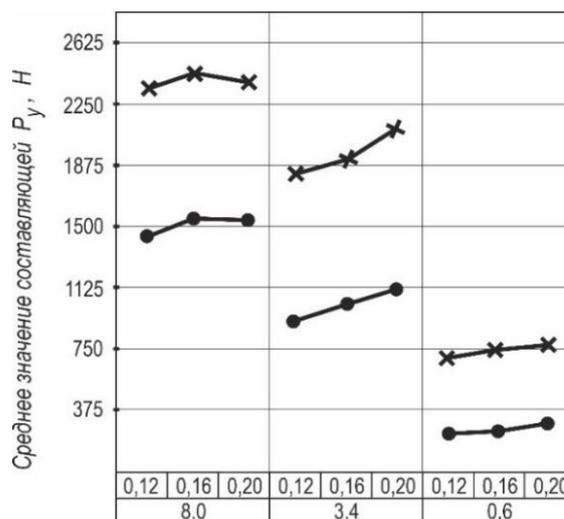


Рис. 5. Зависимости составляющей P_z силы резания от режимов фрезерования (верхняя строка — значения подачи на оборот, мм/об; нижняя строка — глубина резания, мм):
 —●— фрезерование острозаточенной фрезой;
 —×— фрезерование изношенной стандартной фрезой

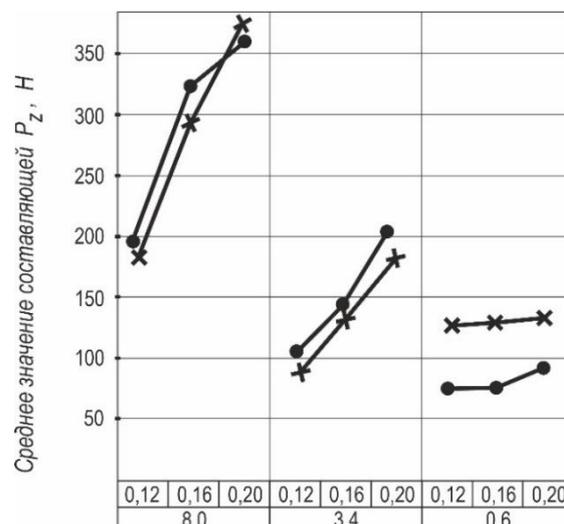
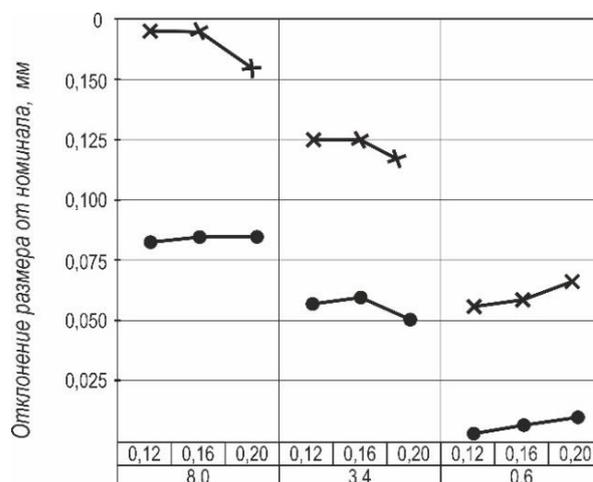


Рис. 6. Зависимости отклонений размеров уступов от режимов фрезерования (верхняя строка — значения подачи на оборот, мм/об; нижняя строка — глубина резания, мм); обозначения см. на Рис. 5



Зависимости от режимов фрезерования упругих деформаций ИС в целом и упругих изгибных деформаций тела стандартных концевых твердосплавных фрез приведены на Рис. 7 и 8.

Рис. 7. Зависимости упругих деформаций тела фрезы от режимов фрезерования (верхняя строка — значения подачи на оборот, мм/об; нижняя строка — глубина резания, мм); обозначения см. на Рис. 5

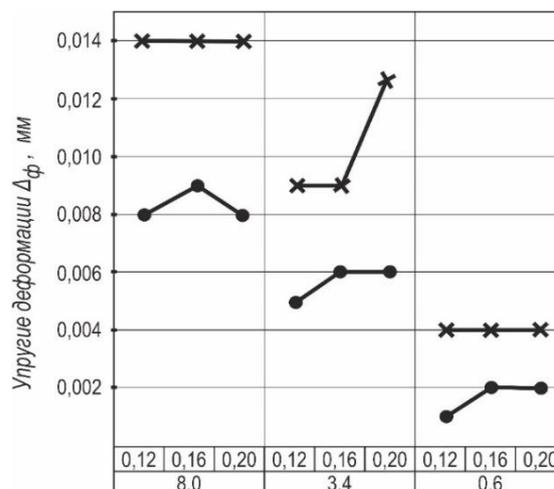
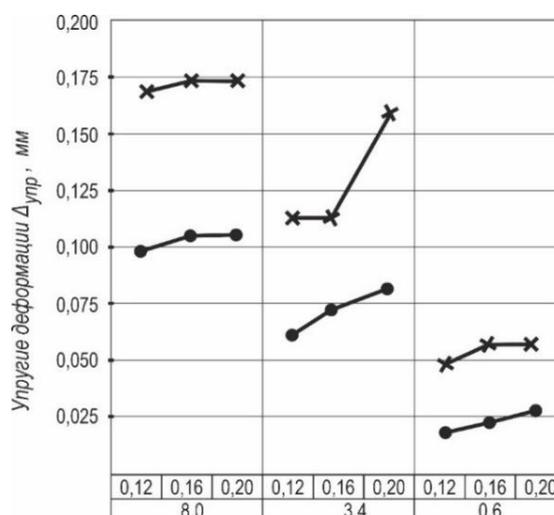


Рис. 8. Зависимости упругих деформаций инструментальной системы от режимов фрезерования (верхняя строка — значения подачи на оборот, мм/об; нижняя строка — глубина резания, мм):
 —●— фрезерование острозаточенной фрезой;
 —×— фрезерование изношенной стандартной фрезой



Определено значение изгибающей силы $P_{изг}$, необходимое для расчета упругих деформаций ИС, на основании экспериментальных данных о силах P_y и P_z .

Установлено, что при чистовом проходе изношенными стандартными концевыми фрезами происходит выход за пределы допуска на окончательный размер обрабатываемой поверхности корпуса.

Третья глава посвящена разработке комплексной методики экспериментальных исследований, реализация которой выполняется на оборудовании на базе 5-координатного прецизионного многоцелевого станка с ЧПУ мод. 528S с автоматической сменой инструмента из магазина на 24 позиции.

Испытания проводятся на экспериментальных образцах концевых твердосплавных фрез (Таблица 1), которые вышлифовываются из твердосплавных стержней с размером зерна не более 0,5 мкм.

Таблица 1

Характеристики экспериментальных фрез

Обозначение фрез	Тип фрез	Геометрические параметры						
		Диаметр, мм	Угол наклона стружечной канавки, град	Число зубьев	Глубина стружечной канавки, мм	Нормальный передний угол главной режущей кромки, град	Задний угол главной кромки в торцовой плоскости, град	Вспомогательный задний угол, град
01	Черновые фрезы	12	15	2	2,3	25	10	10
03				4				
07				2				
08				3				
09			4					
10	Чистовые фрезы		15	2	0,8			
12				4				
16				2				
18				4				
				45	2			

Методика включает полный факторный эксперимент для четырех варьируемых факторов на двух уровнях варьирования планируемого эксперимента для получения полиномиальных уравнений, описывающих зависимости составляющих силы резания от следующих факторов: угла наклона винтовой канавки

к оси; подачи на оборот фрезы; числа зубьев; глубины фрезерования. Исходные данные приведены в Таблице 2.

Принят план полного факторного эксперимента по определению составляющих P_y , P_z и P_x силы резания с четырьмя факторами на двух уровнях с трехкратным повторением опытов. Скорость резания, ширина фрезеруемого уступа, твердость обрабатываемой заготовки и глубина впадины стружечной канавки были назначены как устойчиво постоянные.

Таблица 2

Исходные данные для 4-факторного эксперимента

Факторы	Кодовое обозначение факторов	Уровни факторов			Интервал варьирования
		Нижний (-1)	Верхний (+1)	Основной	
ω , град	x_1	15	45	30	15
S_0 , мм/об	x_2	0,12	0,20	0,16	0,04
z , зубьев	x_3	2	4	3	1
Глубина t , мм	x_4	4	12	8	4

В Главе 4 для определения рациональной конструкции экспериментальных концевых твердосплавных фрез получены расчетные зависимости: а) момента инерции I поперечных сечений концевых фрез диаметром 12 мм с углом наклона $\omega = 45^\circ$ винтовых стружечных канавок от их глубины h ; б) упругой деформации тела фрезы от режимов фрезерования для концевых фрез диаметром 12 мм с углом наклона $\omega = 45^\circ$ винтовых стружечных канавок.

В результате анализа полученных зависимостей установлено, что упругие деформации ИС могут быть существенно снижены и за счет уменьшения податливости концевых фрез. Для подтверждения этого изготовлены экспериментальные конструкции твердосплавных концевых фрез с геометрическими параметрами по Таблице 1.

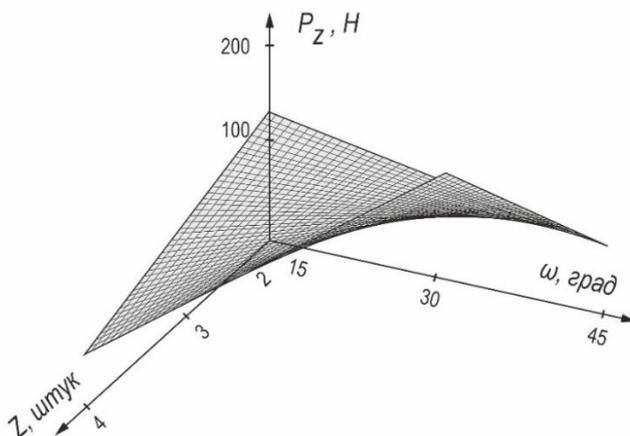
Экспериментальные концевые фрезы с указанными параметрами были вышлифованы из твердосплавных ультрадисперсных (с размером зерна 200...500 нм) стержней марки K44UF-330-h6 диаметром 12,0 мм на высокоточном многокоординатном шлифовально-заточном станке с ЧПУ мод. С-300В. На установке HELICHECK PLUS выполнено измерение геометрических параметров экспериментальных концевых фрез.

В Главе 5 изготовленные экспериментальные концевые фрезы в соответствии с разработанной комплексной методикой были испытаны путем фрезерования типовых поверхностей на призматических заготовках из высокопрочного алюминиевого сплава B95T1.

В результате осуществления плана четырехфакторного эксперимента с двумя уровнями варьирования факторов процесса концевое фрезерование заготовок из высокопрочного алюминиевого сплава В95Т1 получены полиномиальные уравнения, описывающие зависимости составляющих силы резания P_y , P_z и P_x от: а) угла наклона винтовых стружечных канавок $\omega = 15 \dots 45^\circ$; б) количества зубьев $z = 2 \dots 4$; в) глубины фрезерования $t = 0,6 \dots 12$ мм; г) величины подачи $S_o = 0,12 \dots 0,20$ мм/об, которые достоверны не только в экспериментальных точках, но и в других точках факторного пространства.

На Рис. 9 приведен пример поверхности, отображающей частную зависимость составляющей P_z силы резания, который показывает, что при чистовом фрезеровании острозаточенной фрезой с подачей $s = 0,20$ мм/об и глубиной фрезерования $t = 0,6$ мм минимум составляющих силы резания соответствует процессу концевое фрезерования с использованием фрезы с параметрами $h = 0,8$ мм; $z = 2$ и $\omega = 15^\circ$.

Рис. 9. Поверхность, отображающая зависимость $P_z(z, \omega) = (7,7\omega - 176,4)z - (-18,6\omega + 601,6)$ при чистовом фрезеровании острозаточенной фрезой с подачей $s = 0,20$ мм/об и глубиной фрезерования $t = 0,6$ мм



Изгибающая сила $P_{изг}$ при таких параметрах концевой фрезы также является минимальной. Наряду с малой податливостью указанной фрезы уменьшение изгибающей силы $P_{изг}$ положительно влияет на точность обработки, уменьшая отклонение от заданных размеров обрабатываемых поверхностей.

На основании указанных экспериментальных данных получены зависимости упругих изгибных деформаций тела изношенной концевой фрезы диаметром 12 мм для глубин фрезерования 0,6; 3,4 и 8 мм при подачах 0,12; 0,16 и 0,20 мм/об и различных значениях упругих деформаций ИС. Сравнение полученных данных показано на Рис. 10 и 11.

Получены зависимости отклонений размеров и параметров шероховатости обработанных поверхностей от глубины резания, представленные на Рис. 12 и 13.

Рис. 10. Сравнение упругих изгибных деформаций $\Delta_{\text{ф}}$ тела изношенной концевой фрезы для различных

глубин фрезерования:

1 — подача 0,12 мм/об;

2 — 0,16 мм/об;

3 — 0,20 мм/об;

—●— фрезерование экспериментальной фрезой в цанговом патроне с $h = 0,8$ мм, $z = 2$ и $\omega = 15^\circ$;

—×— стандартной фрезой в цанговом патроне с $h = 2,3$ мм, $z = 3$ и $\omega = 30^\circ$;

—○— экспериментальной фрезой в цанговом патроне с $h = 2,3$ мм, $z = 4$ и $\omega = 30^\circ$

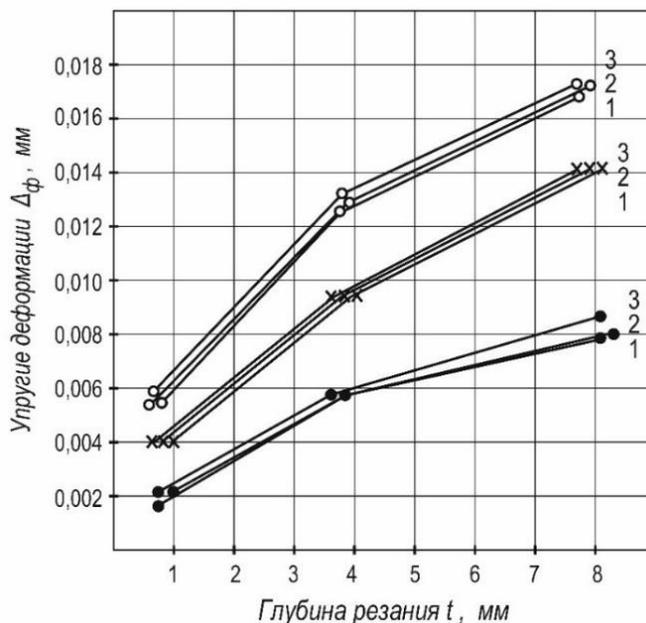


Рис. 11. Сравнение упругих деформаций

$\Delta_{\text{упр}}$ ИС для глубин фрезерования:

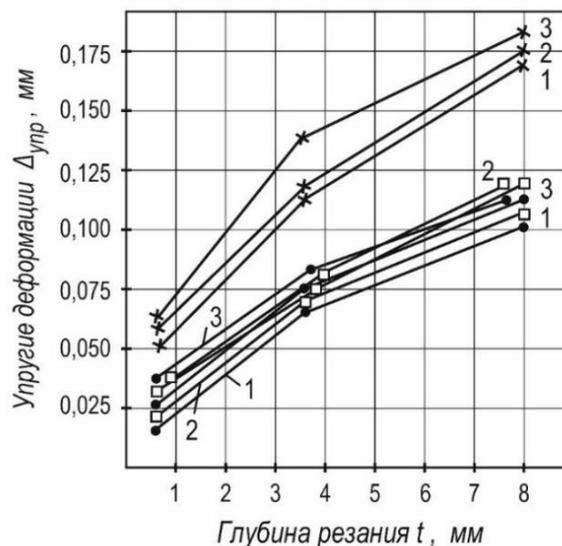
1 — подача 0,12 мм/об; 2 — 0,16 мм/об;

3 — 0,20 мм/об;

—●— фрезерование экспериментальной фрезой в цанговом патроне с $h = 0,8$ мм, $z = 2$ и $\omega = 15^\circ$;

—×— стандартной фрезой в цанговом патроне с $h = 2,3$ мм, $z = 3$ и $\omega = 30^\circ$;

—□— экспериментальной фрезой в гидравлическом патроне с $h = 2,3$ мм, $z = 4$ и $\omega = 30^\circ$



Для определения рациональной конструкции фрезы для чистового фрезерования и разработки рекомендаций по повышению производительности концевое фрезерование корпусов сборного дереворежущего инструмента из высокопрочного алюминиевого сплава В95Т1 применяли полученные в данной работе экспериментальные зависимости параметров шероховатости и отклонений размеров от глубины резания и подачи при чистовом фрезеровании с глубиной 0,2; 0,6 и 1,0 мм.

Рис. 12. Зависимости отклонений размера обработанного уступа от глубины фрезерования при подаче 0,20 мм/об:

- фрезерование острозаточенной фрезой в цанговом патроне;
- ×— фрезерование изношенной фрезой в цанговом патроне;
- фрезерование острозаточенной фрезой в гидравлическом патроне

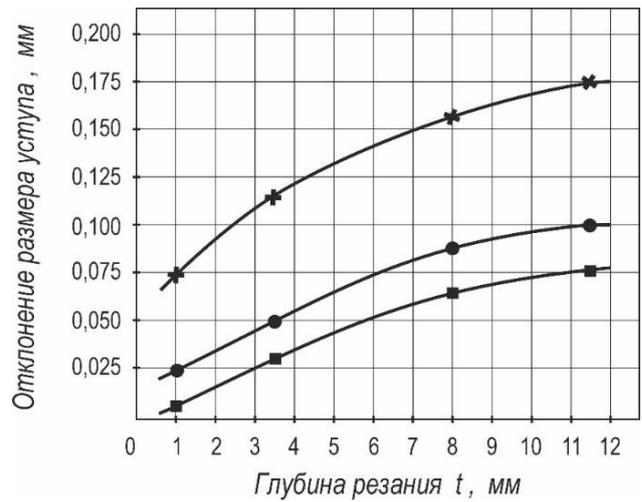
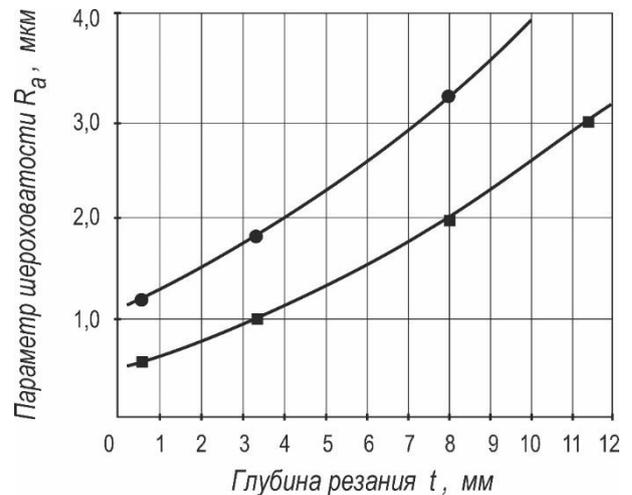


Рис. 13. Зависимости параметра шероховатости обработанной поверхности корпуса от глубины фрезерования фрезой, закрепленной в цанговом патроне, при подаче 0,20 мм/об:

- фрезерование изношенной фрезой;
- фрезерование острозаточенной фрезой



Использовали установленную связь параметров шероховатости и отклонений размеров с моментами инерции поперечных сечений концевых фрез для комплексной оценки влияния их конструктивных параметров на основе построения линий уровня соответствующих технологических ограничений (Рис. 14 и 15).

Рис. 14. Связь параметров шероховатости с моментами инерции поперечных сечений концевых фрез:

- линия 1 соответствует технологическому ограничению — предельному значению параметра шероховатости R_a опорной поверхности уступа; 2 — фрезы с $z = 3$ и $\omega = 15^\circ$; 3 — фрезы с $z = 2$ и $\omega = 45^\circ$; 4 — стандартные фрезы с $z = 3$ и $\omega = 30^\circ$; 5 — фрезы с $z = 3$ и $\omega = 45^\circ$; 6 — фрезы с $z = 4$ и $\omega = 15^\circ$; 7 — фрезы с $z = 4$ и $\omega = 45^\circ$

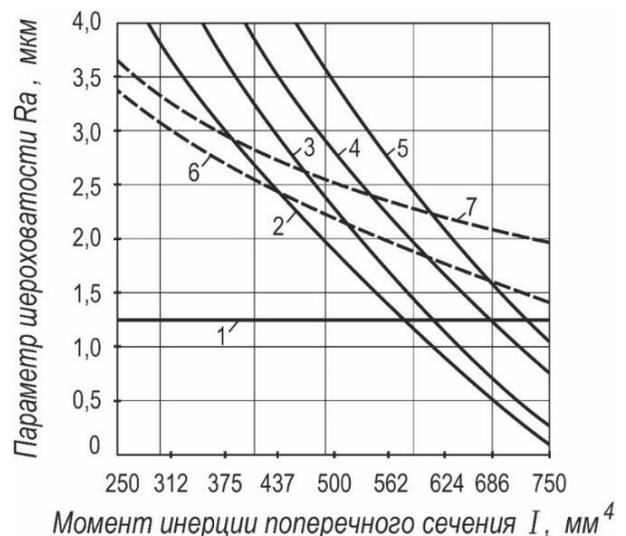
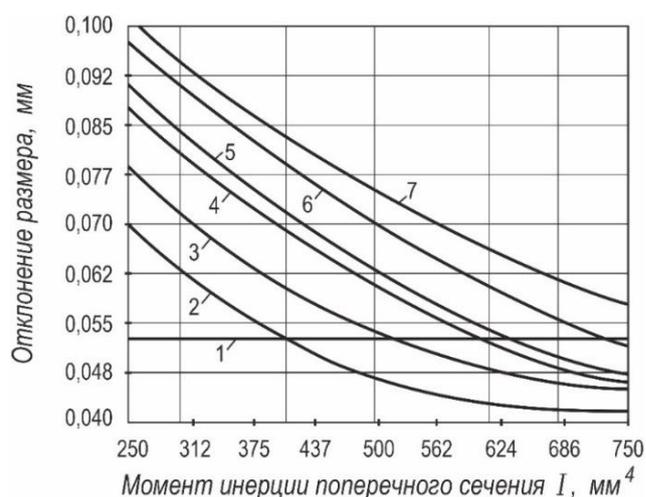


Рис. 15. Связь отклонений размера с моментами инерции поперечных сечений концевых фрез:
 линия 1 соответствует технологическому ограничению — предельному значению отклонения размера опорной поверхности уступа; остальные обозначения см. на Рис. 14



По результатам проведенного анализа для чистового фрезерования уступов в корпусах из высокопрочного алюминиевого сплава рекомендована разработанная и испытанная твердосплавная фреза с параметрами $z = 2$, $\omega = 15^\circ$, $h = 0,8$ мм.

В Главе 6 по результатам исследований для чистового (окончательного) концевое фрезерование уступов в корпусах сборного дереворежущего инструмента из высокопрочного алюминиевого сплава В95Т1 для условий серийного производства дереворежущего инструмента разработаны рекомендации по применению инструментальной системы, включающей: а) твердосплавные концевые фрезы для черновой обработки по стандарту ГОСТ 32405–2013 с $z = 3$; $\omega = 30^\circ$; $h = 2,3$ мм; б) чистовые концевые фрезы с $z = 2$; $\omega = 15^\circ$; $h = 0,8$ мм; в) усовершенствованные по патенту № 197264 цанговые патроны для закрепления черновых концевых фрез; г) гидравлические патроны для закрепления чистовых концевых фрез.

В условиях производственного участка изготовления корпусов сборного дереворежущего инструмента были проведены испытания для проверки эффективности предложенных рекомендаций при фрезеровании корпуса сборной фрезы диаметром 122 мм и высотой 160 мм с четырьмя пазами для установки прямых и фасонных ножей.

По результатам испытаний предложен новый технологический процесс обработки корпуса дереворежущей фрезы, в котором за счет исключения перехода полустового фрезерования штучное время с 44 мин 40 с уменьшено до 36 мин 13 с, что соответствует повышению технологической производительности на 18,9 %, или в 1,23 раза.

Общие выводы по диссертации

1. В результате комплексного исследования решена научно-техническая задача повышения производительности концевой фрезерования корпусов сборного дереворежущего инструмента из высокопрочного алюминиевого сплава В95Т1 на основе установленных зависимостей изменений силовых характеристик процесса концевой фрезерования и параметров качества обрабатываемых поверхностей от конструктивных параметров концевых фрез, средств их закрепления и факторов режимов концевой фрезерования.

2. На основании разработанной комплексной методики установлены экспериментально и расчетным путем зависимости упругих деформаций инструментальных систем и зависимости упругих изгибных деформаций тела концевых фрез от их параметров, включая: а) угол наклона винтовых стружечных канавок $\omega = 15 \dots 45^\circ$; б) количество зубьев $z = 2 \dots 4$; в) глубину стружечных канавок $0,8 \dots 2,3$ мм. Расчетным путем установлено, что податливость концевой фрезы может составлять до 17 % суммарной податливости инструментальной системы.

3. Установлено, что податливость инструментальной системы с гидравлическим патроном составляет $0,078 \text{ мкм} \cdot \text{Н}^{-1}$, средняя арифметическая величина биения — $0,008$ мм, а математическое ожидание величины биения — $0,002$ мм. Податливость инструментальной системы с цанговым патроном составляет $0,081 \text{ мкм} \cdot \text{Н}^{-1}$, средняя арифметическая величина биения — $0,031$ мм, а математическое ожидание величины биения — $0,020$ мм.

4. Установлено, что упругие деформации инструментальной системы при фрезеровании уступов шириной 24 мм и с глубиной резания $t = 3,4 \dots 8,0$ мм соответствуют отклонениям размеров этих уступов от заданных, что позволяет считать примененный метод расчета упругих деформаций инструментальной системы достаточно точным для анализа влияния конструктивных параметров концевых твердосплавных фрез на параметры фрезерования.

5. Установлено, что при фрезеровании окончательного размера уступа в корпусе дереворежущего инструмента на чистовом проходе изношенной стандартной концевой фрезой его отклонения в 2 раза превышают размеры, получаемые при фрезеровании острозаточенной стандартной концевой фрезой, что приводит к выходу за пределы допуска $\pm 0,050$ мм на размеры фрезеруемой поверхности уступа.

6. Получены полиномиальные уравнения, описывающие зависимости составляющих силы резания P_y , P_z и P_x : а) от угла наклона винтовых стружечных канавок $\omega = 15 \dots 45^\circ$; б) от количества зубьев $z = 2 \dots 4$; в) от глубины фрезерования $t = 0,6 \dots 12$ мм; г) от величины подачи $S_0 = 0,12 \dots 0,20$ мм/об для процесса

концевого фрезерования заготовок корпусов из сплава В95Т1 с частотой вращения 6000 мин^{-1} при ширине фрезерования $B = 24 \text{ мм}$, которые использованы для расчета деформаций ИС и тела фрезы.

7. На основании полученных в диссертации данных для чистового (окончательного) концевого фрезерования уступов в корпусах сборного дереворежущего инструмента из высокопрочного алюминиевого сплава В95Т1 выбрана и рекомендована инструментальная система для обработки корпусных деталей сборного дереворежущего инструмента из высокопрочного алюминиевого сплава В95Т1, включающая: а) твердосплавные концевые фрезы для предварительной черновой обработки по стандарту ГОСТ 32405-201 с $z = 3$; $\omega = 30^\circ$; $h = 2,3 \text{ мм}$; б) чистовые концевые фрезы с $z = 2$; $\omega = 15^\circ$; $h = 0,8 \text{ мм}$ для окончательной обработки; в) усовершенствованные по патенту № 197264 цанговые патроны для закрепления черновых концевых фрез; г) гидравлические патроны для закрепления чистовых концевых фрез.

8. Проведенные в ООО «Пилатэкс» экспериментальные исследования эффективности рекомендованной инструментальной системы показали, что благодаря сокращению количества переходов в технологической операции обработки типового корпуса сборного дереворежущего инструмента из высокопрочного алюминиевого сплава В95Т1, достигается сокращение штучного времени с 44 мин 40 с до 36 мин 13 с, что соответствует повышению технологической производительности на 18,9 % или в 1,23 раза.

Основные публикации по теме диссертации

Публикации в рецензируемых изданиях, входящих в перечень ВАК:

1. **Тивирев Е.Г.** Анализ причин погрешности концевого фрезерования изделий из высокопрочного алюминиевого сплава // Вестник МГТУ «Станкин». 2019. № 4. С. 41–46. (0,75 п.л.)
2. **Тивирев Е.Г., Даниленко К.Б.** Критерии оценки эксплуатационного ресурса инструмента // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2017. № 4. С. 112–120 (DOI: 10.18698/0236-3941-2017-4-112-120). (1,0 п.л./0,4 п.л.)

В других научных изданиях:

3. **Тивирев Е.Г.** Проблемы повышения точности фрезерования изделий из высокопрочных алюминиевых сплавов // Сб. статей XXII Международной научно-технической конференции «Проблемы исследования и проектирования машин». Пенза: Приволжский Дом знаний, 2019. С. 81–86. (0,38 п.л.)

4. Маслов А. Р., **Тивирев Е. Г.** Модель системы инструмента для концевое фрезерования // Сб. докладов Всероссийской научно-методической конференции, посвященной 100-летию со дня рождения Н.П. Малевского. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. С. 78–82 (0,25 п.л./0,1 п.л.)
5. Маслов А.Р., **Тивирев Е.Г.** Исследование процесса концевое фрезерования корпусных деталей из алюминиевого сплава В95Т1 // Станкостроение и инновационное машиностроение. Проблемы и точки роста: материалы Всероссийской научно-технической конференции. Уфа: РИК УГАТУ, 2020. С. 20–23. (0,25 п.л./0,1 п.л.)
6. Маслов А.Р., **Тивирев Е.Г.** Обрабатываемость алюминиевого сплава В95Т1 // Сб. статей XV Международной научно-технической конференции «Прогрессивные технологии в современном машиностроении. Материалы и технологии XXI века». Пенза: Приволжский Дом знаний, 2020. С. 90–95. (0,38 п.л./0,2 п.л.)
7. **Тивирев Е.Г.** Исследование инструментальных систем для концевое фрезерования на многоцелевых станках с ЧПУ // Сб. статей XIII Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов «Будущее машиностроения России». М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2020. С. 22–25. (0,38 п.л.)

Патенты:

8. Пат. № 197264 Российская Федерация, МПК В23В 29/03. Патрон для регулировки осевого положения концевой фрезы / А.Р. Маслов, **Е.Г. Тивирев**; заявитель и патентообладатель МГТУ им. Н.Э. Баумана. № 2020103372; заявл. 27.01.2020; опубл. 16.04.2020. Бюл. № 11.
9. Пат. № 197265 Российская Федерация, МПК В23В 29/03. Устройство для крепления концевое режущего модуля / А.Р. Маслов, **Е.Г. Тивирев**; заявитель и патентообладатель МГТУ им. Н.Э. Баумана». № 2020103370; заявл. 27.01.2020; опубл. 16.04.2020. Бюл. № 11.