

ГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ
ЛУГАНСКОЙ НАРОДНОЙ РЕСПУБЛИКИ
«Донбасский государственный технический университет»

На правах рукописи

Пипкин Юрий Владимирович

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ
ФРЕЗЕРНЫХ ПРИСПОСОБЛЕНИЙ
МОДЕЛИРОВАНИЕМ СИЛОВОГО ЗАМЫКАНИЯ**

Специальность 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы
(по отраслям)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Алчевск – 2020

Работа выполнена в государственном образовательном учреждении высшего профессионального образования Луганской Народной Республики «Донбасский государственный технический университет»

Научный руководитель: **Зелинский Анатолий Николаевич**
кандидат технических наук, доцент,
ГОУ ВПО ЛНР «Донбасский государственный
технический университет», профессор кафедры
технологии и организации машиностроительного
производства

Официальные оппоненты: **Снитко Сергей Александрович**
доктор технических наук, доцент,
ГОУ ВПО ДНР «Донецкий национальный тех-
нический университет», профессор кафедры
обработки металлов давлением

Мицык Владимир Яковлевич
кандидат технических наук, доцент,
ГОУ ВПО ЛНР «Луганский национальный уни-
верситет имени Владимира Даля», доцент ка-
федры технологии машиностроения и инженер-
ного консалтинга

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное обра-
зовательное учреждение высшего образования
«Липецкий государственный технический уни-
верситет»

Защита состоится «24» апреля 2020 г. в 11.00 на заседании диссертационного совета Д 001.007.01 на базе ГОУ ВПО ЛНР «Донбасский государственный технический университет» по адресу: г. Алчевск, пр. Ленина, 16 (главный корпус), конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ» в читальном зале по адресу: г. Алчевск, ул. Ленинградская 45-а, библиотека.

Автореферат разослан «____» марта 2020 года

Ученый секретарь
диссертационного совета
кандидат технических наук, доцент



Е.С. Смекалин

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Большинство конструкций машин и механизмов содержат корпусные детали с развитыми плоскими базовыми поверхностями и по статистическим данным около 78 % плоскостей являются открытыми и могут быть получены фрезерованием напроход. Для обеспечения неизменности положения заготовки под действием сил резания в настроенной на заданную точность технологической системе применяют станочные приспособления, в частности фрезерные.

Погрешность обработки, связанная с фрезерным приспособлением, может достигать 45% в общем балансе погрешностей. До 60% этой погрешности образовывается при упругих деформациях элементов приспособления, воспринимающих усилие зажима заготовки и силы резания. Выявление зависимости погрешности обработки от упругих деформаций создает предпосылки для увеличения точности обработки на 1÷2 квалитета и, как следствие, для уменьшения длительности технологического процесса и его себестоимости.

Определение влияния упругих деформаций фрезерного приспособления на формирование погрешности обработки существующими методами инженерного проектирования представляет значительную трудность, так как силовой расчет ведется не во всех точках траектории движения режущего инструмента и использует допущения, основанные на опыте эксплуатации приспособлений в производственных условиях.

Поэтому исследование закономерностей влияния упругих деформаций фрезерных приспособлений на погрешность механической обработки является актуальной научно-технической задачей. Ее решение позволит достигать требуемую точность обработки с учетом параметров фрезерных приспособлений, что будет способствовать повышению эффективности их проектирования и эксплуатации.

Степень разработанности проблемы исследования. Выполнение основной функции фрезерных приспособлений – обеспечение неподвижности заготовки в процессе механической обработки – достигается путем силового замыкания. Силовое замыкание обеспечивается приложением усилий зажима, определяемых при выполнении силового расчета.

Существующая методика силового расчета сформировалась работами В.П. Фираго, М.А. Ансерова, В.С. Корсакова, Б.Н. Вардашкина, В.А. Горохова, Ю.И. Кузнецова, В.Е. Антонюка. Исследованию упругих деформаций отдельных деталей, соединений деталей, напряженного состояния конструктивных элементов с целью обеспечения прочности, износостойкости и точности сборки посвящены работы В.В. Микитянского, В.А. Блумберга, В.Д. Бирюкова, А.В. Ряховского, А.М. Спицко-

го, Л.М. Сердюк и др. Теоретические разработки, выполненные В.В. Микитянским, В.Б. Ильицим, В.И. Аверченковым, В.В. Ерохиным, предполагают применение для проектирования методов динамического анализа виброустойчивости и параметрической чувствительности.

При этом существенным недостатком устоявшейся методики силового расчета остается невозможность учета упругих деформаций элементов конструкции и перемещения режущего инструмента на основе уравнений геометрической статики, применение которых получило наибольшее распространение. Также отсутствует единое формализованное описание силового замыкания звеньев цепи «заготовка - опоры - корпус приспособления - зажимное устройство».

Для разработки новых подходов и методов исследования и проектирования требуется углубление степени теоретической и экспериментальной изученности имеющихся взаимосвязей между параметрами фрезерных приспособлений, упругими деформациями и точностью обработки.

Объектом исследования являются упругие деформации фрезерного приспособления, возникающие под действием сил резания при изготовлении плоских поверхностей.

Предмет исследования — зависимость погрешности формы обработанных плоскостей корпусных деталей от параметров фрезерного приспособления.

Цель исследования — повышение точности обработки плоских поверхностей корпусных деталей при силовом замыкании под действием усилия зажима и сил резания путем обоснования параметров системы фрезерного приспособления.

Для достижения цели исследования потребовалось решить **следующие основные задачи:**

- на основе анализа состояния вопроса определить недостатки методики проектирования станочных приспособлений, выявить резервы и направления ее совершенствования, обобщить основные методы исследования силового замыкания;

- разработать математическую модель фрезерных приспособлений и исследовать зависимости погрешности обработки плоских поверхностей от упругих деформаций приспособления с учетом силовых и конструктивных параметров;

- выработать критерии и практические рекомендации для выбора конструктивных параметров фрезерного приспособления;

- теоретически и экспериментально обосновать изменение конструкции элементов фрезерного приспособления, деформации которых вызывают погрешности механической обработки;

- на основе математической модели, результатов теоретических и экспериментальных исследований предложить методику силовых расчетов конструкции.

Научная новизна полученных результатов исследования. Впервые получено формализованное математическое описание силового замыкания элементов цепи «заготовка - опоры - корпус приспособления - зажимное устройство» в виде кольцевых структур на графе сигналов математической модели системы станочного приспособления.

На основе разработанного нового метода силовых расчетов по всей траектории режущего инструмента, установлена количественная зависимость погрешности формы обработанных плоских поверхностей от конструктивных параметров фрезерного приспособления.

Для обоснования параметров конструкции фрезерных приспособлений впервые применен критерий минимальной погрешности формы обработанной плоской поверхности, в соответствии с которым определены коэффициенты силового замыкания и геометрия рабочей поверхности зажимного элемента.

Теоретическая и практическая значимость исследования состоят в следующем.

Устранены противоречия в обосновании параметров станочных приспособлений, работающих в условиях силового замыкания фактически как статически неопределимая механическая система, но рассчитываемых на основе уравнений геометрической статики.

Теоретически обоснованно применение полюсных графов для формализации связей между структурными элементами и графов сигналов – между параметрами силового замыкания станочного приспособления.

Научные результаты работы впервые устанавливаются в качестве критерия при обосновании конструкции элементов силового замыкания фрезерного приспособления погрешность формы обработанной плоской поверхности.

Для практического выбора параметров фрезерных приспособлений предложены коэффициенты силового замыкания, как безразмерные соотношения между параметрами, и получены сочетания их значений, при которых обеспечивается минимальная погрешность формы.

Новый способ конструирования рабочей поверхности зажимного элемента обеспечивает на практике уменьшение погрешности обработки до 60 % и снижение трудоемкости операций фрезерования.

Результаты диссертационной работы внедрены на ООО «Завод Прогресс 2000» в механическом цехе на фрезерных операциях в виде доработанных конструкций зажимных элементов, а также введены в

учебный процесс на кафедре технологии и организации машиностроительного производства ГОУ ВПО ЛНР «Донбасский государственный технический университет».

Методология и методы исследования. Основой аналитических исследований являются научные положения теоретической механики, теории машин и механизмов, технологии машиностроения. Построение математической модели выполнялось с применением аппарата полюсных графов и графов сигналов. Экспериментальные исследования проводились в виде компьютерного и физического моделирования, а при планировании компьютерных экспериментов использовался симплекс-метод. Обработка результатов физического моделирования, полученных измерением деформаций элементов силового замыкания и отклонений профиля обработанной поверхности, велась с применением методов математической статистики.

Положения, выносимые на защиту.

1. Для учета требований к точности обработки поверхностей силовой расчет станочного приспособления следует выполнять принимая равновесие заготовки при силовом замыкании, как статически неопределимую механическую систему, при этом взаимосвязи между деформационно-силовыми переменными и конструктивными параметрами представлять в виде кольцевых структур на графе сигналов математической модели, а отношения между переменными и параметрами – в форме безразмерных коэффициентов силового замыкания.

2. Для повышения точности обработки плоских поверхностей при обосновании конструктивных параметров фрезерного приспособления необходимо применять критерий минимальной погрешности формы и определять такое сочетание коэффициентов силового замыкания, при котором компенсируется их взаимообратное влияние на изменение характера отклонений профиля от вогнутого к выпуклому.

Степень достоверности. Достоверность результатов исследований подтверждается корректным применением аппарата полюсных графов для построения математической модели силового замыкания фрезерного приспособления, верификацией и проверкой на адекватность разработанной математической модели силового замыкания, использованием проверенных средств измерения в ходе экспериментов с физическими моделями, достаточной достоверностью вероятностью экспериментальных данных и уровнем воспроизводимости проводимых экспериментов.

Апробация результатов. Основные теоретические положения и выводы диссертации рассматривались и обсуждались на заседаниях секции технологии машиностроения научно-технических конференций Донбасского государственного технического университета (г. Алчевск,

2007-2012 гг.), научном семинаре факультета компьютеризованных технологий машиностроения Черкасского государственного технологического университета (2006 г.), на V, VI и XII Международных научно-технических конференциях «Машиностроение и техносфера на рубеже XXI века» (г. Севастополь, 1998, 1999, 2005 гг.), на II Международной научно-практической конференции «Информационная технология в научных исследованиях и учебном процессе» (г. Луганск, 2006 г.), IV и VII Международных конференциях «Стратегия качества в промышленности и образовании» (г. Варна, Болгария, 2008 и 2011 гг.), научной конференции студентов и аспирантов Липецкого государственного технического университета (2016 г.), международной научно-технической конференции «Пути совершенствования технологических процессов и оборудования промышленного производства» (г. Алчевск, 2018 г.).

Публикации. Основные положения исследования отображены в 10 печатных работах, среди которых 3 статьи, опубликованные в рецензируемых научных журналах и изданиях, утвержденных ВАК ЛНР и РФ, 5 статей в сборниках трудов международных конференций, 1 патент на способ и 1 патент на устройство.

Структура диссертации обусловлена предметом, целями, задачами и методологической основой исследования. Работа состоит из введения, четырех разделов (19 подразделов), выводов к разделам, заключения, списка литературы из 254 позиций, 3-х приложений. Общий объем диссертации – 208 страниц (154 страницы – основная часть). В разделах диссертации 69 рисунков и 11 таблиц, в том числе 23 рисунка размещены на 13 отдельных страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследования, определены объект и предмет исследования, отражены научная новизна, теоретическая и практическая значимость результатов исследования.

В первом разделе «Перспективы и задачи совершенствования конструкций фрезерных приспособлений на основе исследования силового замыкания» дана характеристика подходов к проектированию станочных приспособлений, выполнен анализ инженерной методики проектирования, обобщены методы и задачи исследований силового замыкания, определены перспективы совершенствования методов проектирования и задачи моделирования.

Инженерная методика проектирования станочных приспособлений в современном виде возникла в период индустриализации, развития крупносерийного и массового производства и сформирована работами

В.П. Фираго, М.А. Ансерава, В.С. Корсакова, Б.Н. Вардашкина, В.А. Горохова, Ю.И. Кузнецова, В.Е. Антониюка и других. Современный этап развития машиностроительного производства характеризуется преимущественно мелкосерийным выпуском изделий, повсеместным применением станков с ЧПУ и CAD/CAM/CAE/PLM систем. Техническое переоснащение происходит в основном за счет продукции специализированных фирм по изготовлению приспособлений, таких как SCHUNK и ROHM (Германия), KITAGAWA (Япония), BISON (США) и др. Для обеспечения передового технического уровня вновь создаваемых конструкций станочных приспособлений требуется выявление и устранение недостатков в сформировавшейся методике проектирования с учетом современных условий.

Выявленным ключевым недостатком силового расчета, существенно ограничивающим его возможности по учету упругих деформаций, является противоречие между логикой составления уравнений равновесия на основе предположений о возможных критических смещениях заготовки при обработке и использованием уравнений геометрической статики, в которых такие смещения не могут быть учтены. Сделан вывод, что равновесие установленной в приспособлении заготовки следует определять как равновесие статически неопределимой механической системы.

Рассматривая приближения к оценке равновесия заготовки, проф. Корсаков В.С. приводит соображения, из которых следует, что формальное описание силового замыкания должно включать в себя следующие моменты:

- отражать замкнутые связи между звеньями системы «заготовка – опоры - корпус приспособления - зажимное устройство»;
- с учетом усилия(й) зажима;
- с учетом деформаций звеньев системы.

В большинстве работ по проектированию станочных приспособлений описание силового замыкания содержит отдельные элементы. Усилия зажима определяются в силовом расчете, деформации учитываются при необходимости в расчете точности.

В результатах исследований элементов силового замыкания, представленных в работах П.А. Пакидова, В.А. Блюмберга, В.Д. Бирюкова, В.В. Микитянского, В.Б. Ильицкого, А.В. Ряховского, А.М. Спицкого, Л.М. Сердюк, В.И. Аверченкова, В.В. Ерохина и др., формализованного описания, содержащего все указанные выше составляющие, не выявлено.

В целом замкнутость связей между звеньями цепи «заготовка - опоры - корпус приспособления - зажимное устройство» имеет концептуальный характер, формализованное научно-обоснованное описание

силового замыкания отсутствует.

Следовательно, существует необходимость в разработке математической модели силового замыкания фрезерного приспособления. Это позволит определять взаимосвязи между погрешностью обработки и упругими деформациями при заданных параметрах приспособления, на основе выявленных закономерностей находить решения актуальной задачи повышения точности фрезерования плоских поверхностей.

Во втором разделе «Методика моделирования силового замыкания станочного приспособления» решена задача разработки математической модели силового замыкания и получено его формализованное научно обоснованное описание, выполнена экспериментальная проверка адекватности математической модели.

В результате систематизации характеристик станочного приспособления по уровням надсистем силовое замыкание рассматривается как условие целостности технической системы.

Теоретически обосновано применение аппарата полюсных графов, позволяющего обеспечить единство подходов к разработке структурно-функциональных математических моделей станочных приспособлений на разных уровнях детализации системы.

Из соображений минимальной размерности математической модели и для охвата в перспективе всего класса технических систем станочных приспособлений разработана расчетная схема (рис. 1), которая реализует необходимые условия для получения заданного размера R_1 .

Расчетная схема силового замыкания включает в себя:

– заготовку, установленную на три опорных элемента с номерами 1, 2, 3;

– точку q приложения усилия зажима Q , создаваемого зажимным механизмом и приводом, и точку p для силы резания P , разлагаемой на составляющие – нормальную P^n и тангенциальную P^r к плоскости опор 1, 2, 3;

– жесткости опор K_i ;

– координаты точек (x_{ij}, y_{ij}) в прямоугольных координатах $(OXY)_j$ подсистем шаблона системы координат модели, где i – индекс принадлежности точки к структурным элементам (принимает значения индексов точек – 1, 2, 3, q , p), j – индекс подсистемы (принимает значения номеров опор – 1, 2, 3, основная подсистема имеет индекс «3»).

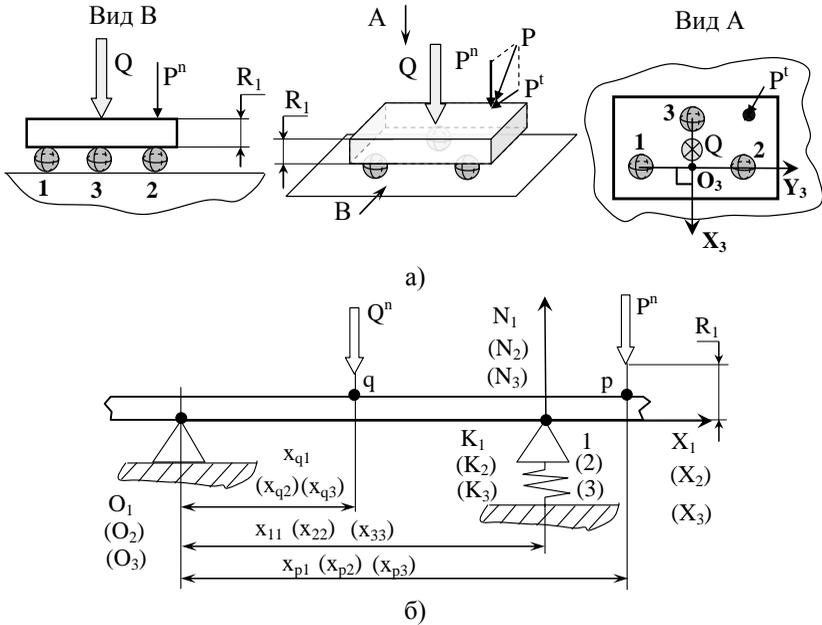


Рисунок 1 – Проекция расчетной схемы силового замыкания (а) и обобщенная расчетная схема с учетом координат и жесткостей (б)

На основе применения принципа возможных перемещений к обобщенной расчетной схеме (рис. 1, б) был сформирован полюсный граф, преобразованный в граф сигналов (рис. 2) в виде связей между переменными (указанными в вершинах графа) и параметрами (указанными как веса дуг графа) математической модели.

Граф сигналов (рис. 2) включает в себя силовые (поперечные) переменные η_j ; деформационные (продольные) переменные ξ_j ; передаточные коэффициенты k_{kl} , определяемые из соотношения координат точек x_{ij} ; жесткости элементов расчетной схемы K_i ; усилие зажима ηQ^n ; нормальную ηP^n и тангенциальную ηP^t составляющие силы резания, коэффициенты трения покоя f_{TP} .

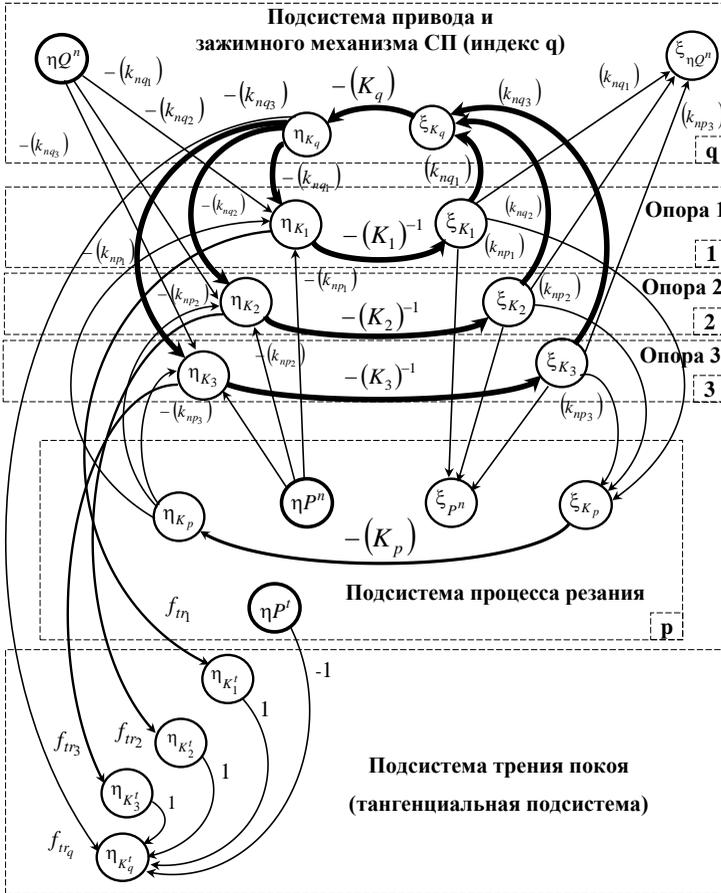


Рисунок 2 – Кольцевые зависимости графа сигналов математической модели силового замыкания

На графе сигналов получено формализованное описание силового замыкания в виде кольцевых зависимостей между переменными и параметрами системы (рис. 2, показаны утолщенными линиями дуг графа), включающих переменные сил и перемещений, а также передаточные коэффициенты и жесткости элементов.

По графу сигналов (рис. 2) составлена система уравнений, решенная в общем виде в математическом пакете Maple. Для проведения численных экспериментов полученное решение системы уравнений было реализовано в пакете MathCad.

Выполнена верификация математической модели. Отработана методика экспериментальных исследований при проверке адекватности математической модели на физической модели расчетной схемы.

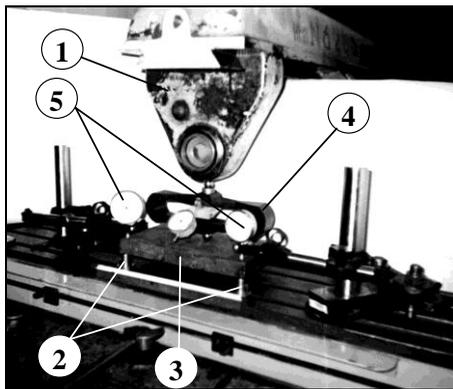


Рисунок 3 – Лабораторная установка для оценки адекватности математической модели

Физическая модель расчетной схемы собиралась на базе лабораторной установки (рис. 3), включающей в себя горизонтальный консольно-фрезерный станок модели 6М82 (поз. 1), опорные элементы (поз. 2) со скругленной головкой радиусом 25 мм с допускаемой нагрузкой 12 кН, заготовку из стали 65Г 300×150×50 мм (поз. 3), динамометр ДОСМ–3–5 (поз. 4), два индикатора многооборотовых (поз. 5) для измерения упругих деформаций в опорах.

Измерение профиля обработанной поверхности выполняется с помощью индикатора типа ИРБ в соответствии с ГОСТ Р 53442–2015. При измерениях исключение шероховатости обеспечивалось путем механической фильтрации, когда шаг измерений превышает базовую длину по ГОСТ 2789–73.

На основе экспериментов с физической моделью расчетной схемы определены параметры жесткости для математической модели.

Выполнена статистическая обработка экспериментальных данных и оценка влияния случайных факторов на характер упругих деформаций. Подтверждена адекватность математической модели. Предложен алгоритм компьютерного моделирования силового замыкания станочного приспособления. Сделан вывод о возможности применения разработанной математической модели для исследования упругих деформаций станочного приспособления.

В третьем разделе «Исследование силового замыкания фрезерного приспособления методом математического моделирования» на основе разработанной математической модели выполнены исследования влияния упругих деформаций на погрешность фрезерования плоскостей в зависимости от параметров силового замыкания.

Критерием оценки принято отклонение формы поверхности, как результата суммарной деформации в точке приложения силы резания,

т.е. в точке работы режущего инструмента. Погрешность складывается из составляющих, вносимых каждой из опор, и составляющей, зависящей от жесткости со стороны процесса резания:

$$\Delta_p = \xi_{Kp1} + \xi_{Kp2} + \xi_{Kp3} + \xi_p = \xi_{K1} \cdot k_{p1} + \xi_{K2} \cdot k_{p2} + \xi_{K3} \cdot k_{p3} + \xi_p, \quad (1)$$

где Δ_p – погрешность, определяемая в точке приложения силы резания, мм;

ξ_{Kpi} – составляющая, определяемая влиянием упругой деформации в i -й опоре, мм,

k_{pi} – передаточный коэффициент от i -й опоры к зоне резания,

ξ_{Ki} – упругая деформация в i -й опоре, мм,

ξ_p – упругая деформация в подсистеме процесса резания в точке приложения силы резания, мм.

При исследовании закономерностей влияния упругих деформаций на формирование погрешности обработки в соответствии с формулой (1) определены следующие исходные данные: усилие зажима (с учетом применения ручного винтового зажима – до 16 500 Н), нормальная к плоскости опор сила резания с начальной величиной 400 Н, параметры жесткости элементов силового замыкания (с жесткостью в 25 000 Н/мм, рассчитанной по экспериментальным данным раздела 2).

В результате вычислительных экспериментов в системе MathCAD установлены соотношения между силовыми и жесткостными параметрами силового замыкания, при которых образуется минимальное отклонение профиля, т.е. минимальная погрешность формы.

Для выявления механизма формирования минимальной погрешности и апробации возможностей математической модели по выполнению силового расчета проведены две серии вычислительных экспериментов с применением симплекс-метода планирования. В качестве функции отклика в первой серии принималось наименьшее усилие зажима и положение точки его приложения, во второй – равенство деформаций в опорах при заданном минимальном усилии зажима.

Результаты вычислительных экспериментов позволили сделать вывод о необходимости исследования стационарных состояний системы фрезерного приспособления при силовом замыкании с учетом положения режущего инструмента. При этом формула погрешности обработки (1) преобразуется в следующий вид:

$$\Delta_p = f(\Pi_{REZ}, \Pi_q, \Pi_p), \quad (2)$$

где $\Pi_{\text{REZ}} = Q/P_{\text{Pn}}$ – коэффициент силового замыкания, учитывающий отношение силовых переменных,

Q – усилие зажима, Н,

P_{Pn} – составляющая силы резания, направленная перпендикулярно плоскости опор (по схеме лезвийной обработки плоскостей – в направлении выдерживаемого размера), Н;

$\Pi_{\text{q}} = K_{\text{q}}/K_{\text{оп}}$, $\Pi_{\text{p}} = K_{\text{p}}/K_{\text{оп}}$ – коэффициенты силового замыкания, учитывающие отношения жесткостных параметров;

K_{q} , K_{p} , $K_{\text{оп}}$ – приведенные коэффициенты жесткости подсистем, соответственно, «заготовка - зажимной элемент», «заготовка - режущий инструмент», «заготовка - опорный элемент», Н/мм.

Для исследования стационарных состояний системы применена реализация математической модели силового замыкания в системе MATLAB Simulink, которая позволила представить граф сигналов силового замыкания (рис. 2) в виде структуры из стандартных блоков пакета, при этом составления и решения системы уравнений не требуется.

В результате моделирования получены графики зависимости погрешности формы от сочетания коэффициентов силового замыкания из формулы (2) для точек стационарных состояний системы силового замыкания вдоль траектории движения режущего инструмента (рис. 4, а).

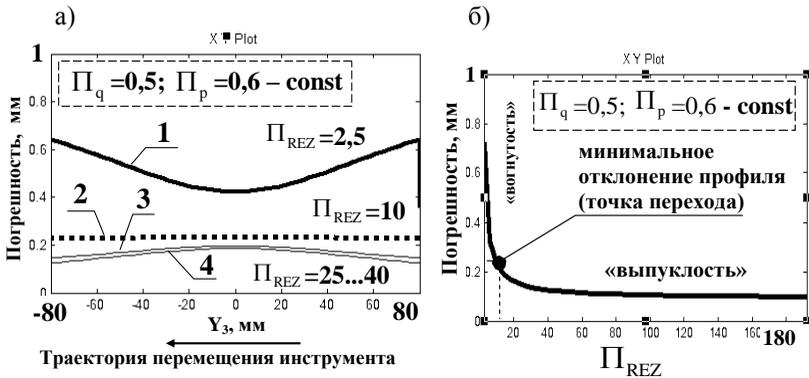


Рисунок 4 – Результаты расчета погрешности профиля:

а – отклонение от прямолинейности для некоторых значений Π_{REZ} ;

б – изменение характера профиля в области значений Π_{REZ} для точки с координатой $y_{\text{p3}} = +80$ мм

На примере рассчитанных графиков профиля видно (рис. 4, а), что при различных сочетаниях параметров в процессе обработки может возникать как выпуклость (линии 3 и 4 на рис. 4, а из области значений $\Pi_{REZ} > 10$ по рис. 4, б), так и вогнутость (линия 1 на рис. 4, а из области значений $\Pi_{REZ} < 10$ по рис. 4, б). Также существует такое сочетание параметров системы, при котором погрешность формы минимальна (линия 2 на рис. 4, а, обозначенная точкой на рис. 4, б, $\Pi_{REZ} = 10$).

Моделированием на теоретически установленном диапазоне значений параметров определены рациональные пределы изменения и сочетания значений коэффициентов силового замыкания (КСЗ), при которых образуется минимальное отклонение профиля, т.е. минимальная погрешность формы (табл. 1). Полученные наборы значений рекомендуются в качестве начальных условий для обоснования параметров фрезерных приспособлений.

Таблица 1 – Значения коэффициентов силового замыкания, теоретические пределы их изменения и закономерности влияния на отклонения профиля

КСЗ	Теоретические пределы изменения		Наборы значений с минимальным отклонением профиля (точки перехода)			Изменение характера отклонения профиля (выпуклость «←»), вогнутость «→»)	
	от	до				от	до
Π_{REZ}	2,5	25	4	10	25	+	–
Π_q	0,4	0,7	0,5	0,6	0,7	+	–
Π_p	0,1	1	0,7	0,7	0,3	–	+

В четвертом разделе «Совершенствование конструкций фрезерных приспособлений на основе моделирования силового замыкания» предложен способ конструирования специального профиля рабочей поверхности зажимного элемента по критерию минимальной погрешности формы обрабатываемой поверхности. Конструкция зажимного элемента со специальным профилем обеспечила уменьшение погрешности формы плоской поверхности при фрезеровании на 35% ÷ 63% и повышение жесткости технологической системы в 1,5 ÷ 2,5 раза.

Совершенствование конструкции фрезерных приспособлений на основе состава кольцевых зависимостей между параметрами силового замыкания станочного приспособления (рис. 2) возможно по следую-

щим направлениям: 1) изменением жесткости зажимного элемента; 2) изменением жесткости опорных элементов; 3) изменением передаточных коэффициентов; 4) путем комбинирования вариантов.

За основу разработок было взято 3-е направление с учетом теоремы о минимуме потенциальной энергии для статически неопределимых систем. Уменьшение величины потенциальной энергии деформации возможно вследствие уменьшения упругих деформаций опорных элементов, что, в конечном счете, приведет к повышению точности обработки. Неопределенность точек контакта зажимного элемента с заготовкой ведет к неопределенности возникающих упругих деформаций.

Математическая модель силового замыкания позволяет рассчитать положение таких точек зажима, которые соответствуют минимальной погрешности обработки. Совокупность этих точек сформирует геометрию специального профиля рабочей поверхности зажимного элемента.

На модели определено положение таких точек приложения усилия зажима, для которых в точке приложения силы резания будет получаться одинаковая по величине погрешность обработки. Эти точки зажима расположились на линиях уровня (рис. 5, а), причем разной величине погрешности (указана в окружностях на рис. 5, а в мм) соответствует своя линия уровня.

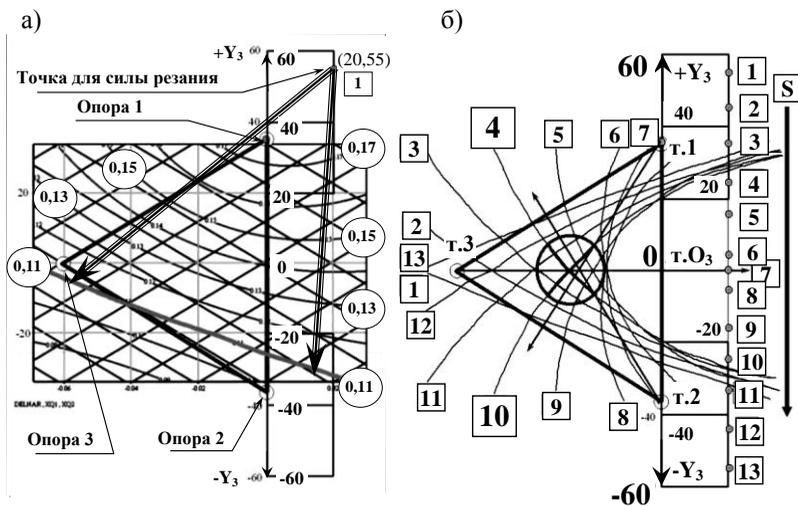


Рисунок 5 – Уровни точек приложения усилия зажима при одинаковой погрешности обработки в заданной точке приложения силы резания:
а) для одной точки; б) для комплекта точек траектории перемещения инструмента

По мере удаления точки зажима от точки силы резания величина погрешности уменьшается. Точки зажима с наименьшей погрешностью обработки равной 0,11 мм лежат на линии уровня, максимально удаленной от точки приложения силы резания в пределах треугольника опор (указано стрелками из точки 1 на рис. 5,а).

Выполнены вычисления для точек на линии перемещения режущего инструмента в направлении подачи s (эти точки и соответствующие им линии уровня обозначены номерами в квадратах на рис.5, б).

Для каждой точки выбиралась линия уровня, соответствующая минимальной погрешности, равной 0,11 мм. Получено множество линий уровня (рис. 5, б).

Для полученного множества линий уровня с одинаковой расчетной погрешностью обработки при центральном расположении точки зажима предложена конструкция зажимного элемента, представляющая собой плоскую пяту (рис. 6, а), у которой на поверхности, обращенной к заготовке, предлагается расположить на полученных линиях уровня 4 и 10 (рис. 5, б и рис. 6, б) шариковые элементы (рис. 6, в), образующие специальный профиль.

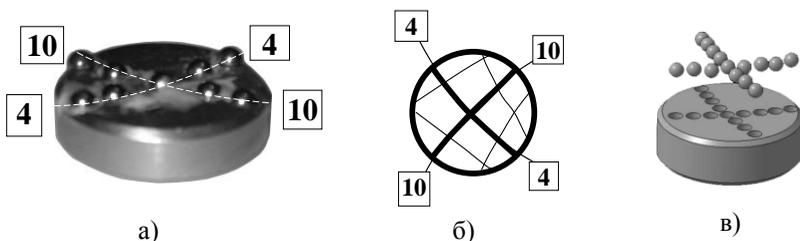


Рисунок 6 – Конструкция зажимного элемента:

- а – конструкция зажимного элемента со специальным профилем;
- б – линии уровня (по рис. 5, б) для расположения шаровых элементов ;
- в – 3D-модель сборки

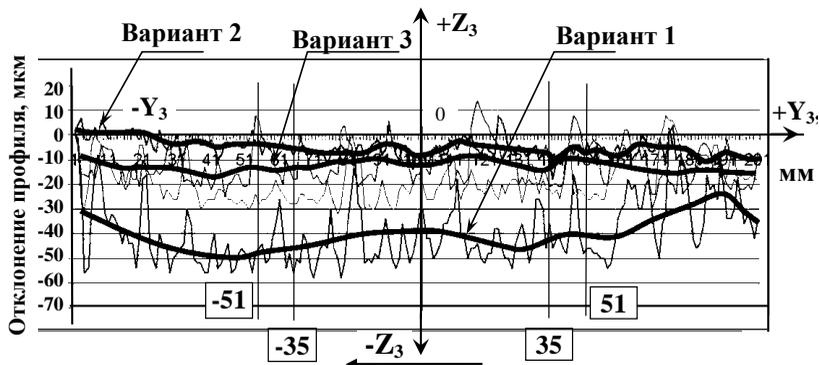
Для предложенной конструкции зажимного элемента были проведены экспериментальные испытания при обработке плоского уступа детали «пластина» на горизонтально-фрезерном станке модели 6М82.

Фрезерование проводилось при трех вариантах конструкции зажимного элемента, отличающихся геометрией профиля рабочей поверхности: 1 – зажим торцом винта (точечный контакт); 2 – зажим плоскостью пяты (без шариков – многоточечный неорганизованный контакт); 3 – зажим пятой с шариками (рис. 6, контакт, организованный специальным профилем).

Обработка велась на постоянных режимах резания. Затем выполнено измерение профиля обработанной поверхности.

По результатам измерения получены графики (рис. 7), на которых погрешность профиля выделена приведением к скользящему среднему.

Установлено, что погрешность формы составила для точечного зажима – 0,30 мм, для зажима плоской пятой типовой конструкции – 0,17 мм и для зажима со специальным профилем – 0,11 мм.



Направление движения фрезы S (точки приложения силы резания) (рис. 5,б)

Рисунок 7 – Графики профиля обработанной поверхности для различных вариантов профиля рабочей поверхности зажимного элемента

Таким образом, применение специального профиля рабочей поверхности зажимного элемента обеспечивает уменьшение погрешности формы на 35% по сравнению с типовой конструкцией и на 63% по сравнению с максимальной погрешностью при точечном зажиме.

Сравнение результатов расчета и измерений для точечного зажима по критериям Фишера и Кохрена показало адекватность математической модели силового замыкания на длине траектории инструмента 102 мм (координаты –51 мм и +51 мм по оси Y_3 на рис. 7), составляющей 1,42 от длины стороны треугольника опор, равной 70 мм (координаты -35 мм и +35 мм по оси Y_3 на рис. 7).

На основе достигнутого уменьшения погрешности формы при фрезеровании уступа определена возможность эффективного применения специального профиля рабочей поверхности зажимного элемента на основе повышения жесткости технологической системы механической обработки (ТСМО) в 1,5÷2,5 раза (табл. 2), позволяющего работать с увеличенными силами резания.

Таблица 2 – Расчет жесткости технологической системы при фрезеровании уступа

Тип контакта с заготовкой	Размерная нагрузка, Н	Погрешность профиля, мм	Расчетное значение жесткости ТСМО, Н/мм	Кратность увеличения жесткости ТСМО	
				От меньшей	От средней
Точечный	2750	0,30	9167	1,00	-
Плоскостной		0,17	16176	1,76	1,00
Специальный		0,11	25000	2,72	1,54

Прогнозируемый экономический эффект от повышения производительности фрезерных операций в расчете на одно рабочее место составил 40470 рублей в год со сроком окупаемости 3,35 года.

Полученные в четвертом разделе результаты подтверждают практическую ценность и перспективность разработанного метода обоснования параметров фрезерных приспособлений.

Приложения содержат построение полюсного графа системы, акты внедрения, патенты, экономический анализ.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Диссертация является завершенной научно-исследовательской работой, в которой на основе впервые установленных закономерностей упругих деформаций фрезерного приспособления при силовом замыкании решена актуальная научно-техническая задача повышения точности обработки плоских поверхностей путем совершенствования конструкции зажимных элементов и рационализации геометрических и жесткостных параметров системы с учетом силы резания и траектории перемещения режущего инструмента.

Основные научные и практические результаты работы:

1. Впервые получено формализованное математическое описание силового замыкания в виде колец на графе сигналов, позволяющее формировать уравнения математической модели.

2. Впервые установлена количественная зависимость погрешности формы плоской поверхности от силовых и конструктивных параметров силового замыкания фрезерного приспособления.

3. Впервые предложен метод силовых расчетов станочного приспособления в каждой точке при перемещении режущего инструмента.

4. Определены условия выбора параметров конструкции при сило-

вом замыкании станочного приспособления по критерию минимальной погрешности обработки профиля плоской поверхности, представляемые в виде комплекса безразмерных коэффициентов.

5. Обоснован способ определения геометрии специального профиля рабочей поверхности зажимного элемента фрезерных приспособлений, обеспечивающего уменьшение погрешности формы при обработке плоскостей.

6. Предложена конструкция зажимного элемента фрезерного приспособления, обеспечивающая уменьшение погрешности формы от 35% до 63%.

7. Применение специального рабочего профиля зажимного элемента фрезерного приспособления привело к повышению жесткости технологической системы в 1,5÷2,5 раза.

8. Ожидаемый экономический эффект от внедрения новой конструкции зажимного элемента при выполнении фрезерных операций составил 40470 р. в год в расчете на одно рабочее место.

9. Разработанный метод определения параметров фрезерных приспособлений и способ определения специального профиля рабочей поверхности зажимных элементов применены для доработки конструкции зажимных элементов и корректировки режимов для фрезерования плоскостей на ООО «Завод Прогресс 2000».

10. Отдельные положения диссертации и разработанные лабораторная установка и методика экспериментальных исследований используются в учебном процессе на кафедре «Технология и организация машиностроительного производства» ГОУ ВПО ЛНР «ДонГТУ».

Основные научные публикации по теме диссертационного исследования

Статьи, опубликованные в ведущих рецензируемых научных журналах и изданиях, рекомендованных ВАК Луганской Народной Республики.

1. Пипкин, Ю.В. Анализ силового замыкания в станочных приспособлениях. / Ю.В. Пипкин // Вісник СДТУ. Серія: Технічні науки (Машинобудування). – Суми: СДТУ, 2002. – № 2 (35). – С. 88-93.

2. Пипкин, Ю.В. Базовая расчетная схема силового замыкания в станочных приспособлениях. / Ю.В. Пипкин, А.Н. Зелинский, Н.В. Коцюбинская // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародн. зб. наук. праць. – Донецьк: ДонНТУ, 2006. – Вип. 31. – С. 227-237.

3. Пипкин, Ю.В. Математическое моделирование влияния силового замыкания станочного приспособления на погрешность формы плоскостей / Ю.В. Пипкин, А.Н. Зелинский // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – № 6/7 (54). – С. 39-47.

Доклады на научных конференциях и другие научные публикации

4. Пипкин, Ю.В. Структурно- функциональные графовые модели технологических систем механической обработки / Ю.В. Пипкин, А.Н. Зелинский // «Прогрессивные технологии и системы машиностроения»: материалы V Международн. научн.-техн. конф. «Машиностроение и техносфера на рубеже XXI века» (г. Севастополь 8-11 сентября 1998 г.) В 3-х томах. – Донецк: ДонГТУ. – 1998. – Вып. 6 (Т.2). – С. 297-300.

5. Пипкин, Ю.В. Методика анализа силового замыкания технической системы станочного приспособления / Ю.В. Пипкин, А.Н. Зелинский, Н.В. Коцюбинская // «Машиностроение и техносфера XXI века»: сб. тр. XII междунаод. научн.-техн. конф. (г. Севастополь 12-17 сентября 2005 г.). В 5-ти томах. – Донецк: ДонНТУ, 2005. – Т.3. – С. 64-69.

6. Пипкин, Ю.В. Выбор места приложения усилия зажима с помощью имитационной модели. / Ю.В. Пипкин // «Информационные технологии в научных исследованиях и учебном процессе»: материалы II Международ. научн.-практ. конференции (г. Луганск, 14-16 ноября 2006 г.). – Алчевск: ДонГТУ; Луганск: ЛНПУ, 2006. – С.161-171.

7. Пипкин, Ю.В. Инновационные перспективы анализа станочных приспособлений как класса технических систем / Ю.В. Пипкин, А.М. Зинченко, Н.А. Денисова // «Стратегия качества в промышленности и образовании» (Варна, Болгария, 30 мая – 6 июня 2008 г.): материалы IV Международ. конф. В 2-х т.. – Дніпропетровськ-Варна: Волант-ТУ-Варна, 2008. – Том 1. – С. 446 – 450.

8. Пипкин Ю.В. Укрупненная оценка ожидаемого экономического эффекта от повышения точности механической обработки / Ю.В. Пипкин, А.М. Зинченко / «Стратегия качества в промышленности и образовании»: материалы VII Международ. конф. (Варна, Болгария, 3 – 10 июня 2011 г.). В 3-х томах.– Днепропетровск-Варна: Волант-ТУ-Варна, 2011. – Том 1. – С. 156-160.

Патенты

9. Деклараційний патент на винахід. UA 62614 А. МКИ В23 Q3/00. Спосіб закріплення деталей / Ю.В.Піпкін. – № 2003043400; Заявл. 15.04.2003; Опубл. 15.12.2003. Бюл. № 12. 2003 р. – 4 с.; ил.

10. Патент на корисну модель. UA 57340 А. МКИ В23 Q3/06. Пристрій для установки заготовок / Ю.В. Піпкін, А.М. Зелінський, Г.О. Нестерова, К.С. Кошелєва, С.В. Андрейчук. – № u201008684; Заявл. 12.07.2010; Опубл. 25.02.2011. Бюл. № 4. 2011 р. – 4 с.; ил.

АННОТАЦИЯ

Пипкин Ю.В. Обоснование параметров фрезерных приспособлений моделированием силового замыкания. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.13 – Машины, агрегаты и процессы (по отраслям) – ГОУ ВПО ЛНР «Донбасский государственный технический университет». – Алчевск, 2020.

В диссертационной работе изложены результаты исследований по определению закономерностей влияния упругих деформаций фрезерного приспособления на формирование погрешности формы плоских поверхностей. Предложен новый метод силовых расчетов, а также рекомендации по определению параметров фрезерных приспособлений, позволившие достичь уменьшения погрешности формы при обработке плоской поверхности.

Разработанный метод основывается на подходе к проектированию станочных приспособлений как технических систем, для которых силовое замыкание определяет целостность и является состоянием, которое характеризуется образованием взаимосвязей между деформационно-силовыми переменными и конструктивными параметрами, описываемыми кольцевыми структурами на графе сигналов математической модели. Равновесие заготовки при силовом замыкании представляется статически неопределимой механической системой, для которой при формировании уравнений в математической модели применяется принцип виртуальных перемещений.

Теоретические исследования закономерностей упругих деформаций позволили определить сочетания параметров системы приспособления в состоянии силового замыкания (коэффициенты силового замыкания), при которых обеспечивается минимальная погрешность формы обрабатываемых плоскостей.

Сформулирован способ конструирования геометрии специального профиля рабочей поверхности зажимных элементов с целью уменьшения погрешности формы при фрезеровании плоских поверхностей.

С помощью предложенного способа конструирования определены геометрические параметры специального профиля рабочей поверхности зажимного элемента, обеспечившего уменьшение погрешности формы при фрезеровании плоскости от 35% до 63%.

Результаты исследования изложены в восьми научных статьях.

Ключевые слова: фрезерное приспособление, силовое замыкание, упругая деформация, техническая система, моделирование, фрезерование плоскости, погрешность формы.

SUMMARY

Pipkin Yu.V. Rationale of the parameters of workholding fixtures for milling by modeling a force closure. - The manuscript.

Thesis for the degree of candidate of technical sciences, specialty 05.02.13 – Machines, units and processes (by industry). – SEI HPE LPR «Donbass State Technical University». – Alchevsk, 2020.

The dissertation work explicates the researches results to determine the regularity of the influence of elastic deformations of a workholding fixtures for milling on the formation of a shape error of the flat surfaces.

A new method of forces calculation is proposed, as well as recommendations for determining the parameters of workholding fixtures for milling, which made it possible to achieve a decrease in the shape error when processing a flat surface.

The developed method is based on the approach to the design of workholding fixtures as technical systems for which the force closure determines integrity and is a state characterized by the formation of relationships between deformation-force variables and constructional parameters described by ring structures of the mathematical model in the form signal flow graph.

The equilibrium of a workpiece during a force closure seems to be a statically indefinable mechanical system, for which the principle of virtual displacements is applied when forming equations in a mathematical model.

Theoretical researches of the regularity of elastic deformations made it possible to determine combinations of parameters of the system of the workholding fixture in the state of force closure (force closure coefficients), at which the minimum error in the shape of the machined planes is ensured.

A method is formulated for constructing the geometry of a special profile of the working surface of the clamping elements in order to reduce the shape error when milling flat surfaces.

Using the proposed design method, the geometric parameters of the special profile of the working surface of the clamping element are determined, which ensured a decrease in the shape error during milling of the plane from 35% to 63%.

The results of the research are presented in eight scientific articles.

Key words: workholding fixtures for milling, force closure, elastic deformation, technical system, modeling, milling planes, shape error.