

БЕЛОРУССКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 621.9.06

ОРУКАРИ
Бокумо Дж.

**ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО
ПРОЕКТИРОВАНИЯ ОПЕРАЦИИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ
НА ДВУХСУППОРТНЫХ ТОКАРНЫХ СТАНКАХ С ЧПУ**

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени кандидата технических наук
по специальности 05.02.08 – Технология машиностроения

Минск 2018

Работа выполнена в Белорусском национальном техническом университете

Научный руководитель **КАШТАЛЬЯН Иван Алексеевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Технология машиностроения» Белорусского национального технического университета;

Официальные оппоненты: **ДАНИЛОВ Виктор Алексеевич**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры «Металлорежущие станки и инструменты» Белорусского национального технического университета;

ГРИВАЧЕВСКИЙ Александр Георгиевич, кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией моделирования технологических процессов ГНУ «Объединенный институт проблем информатики Национальной академии наук Беларуси»;

Оппонирующая организация ГНУ «Объединенный институт машиностроения Национальной академии наук Беларуси»

Защита состоится 29 июня 2018 года в 14⁰⁰ часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.05.03 при Белорусском национальном техническом университете по адресу: 220013, г. Минск, проспект Независимости, 65, корпус 1, ауд. 202, тел. ученого секретаря (+37517) 292-24-04.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Белорусского национального технического университета.

Автореферат разослан 29 мая 2018 г.

Ученый секретарь
совета по защите диссертаций Д 02.05.03,
доктор технических наук, профессор



О.Г. Девойно

© Орукари Б. Дж., 2018
© Белорусский национальный
технический университет, 2018

ВВЕДЕНИЕ

Современный этап развития машиностроительного производства характеризуется широким внедрением станков с числовым программным управлением (ЧПУ). Только в Республике Беларусь эксплуатируется более 16 тысяч станков с ЧПУ. Около 40% из них относится к группе токарных, причем в последние годы делается акцент на двухсуппортные станки, характерной особенностью которых является наличие ряда дополнительных функций (независимое управление координатными перемещениями; управление кинематикой процессов резания и др.). Являясь сложным и дорогостоящим оборудованием, станки с ЧПУ этого типа требуют эффективной подготовки производства, обеспечивающей высокую их производительность при эксплуатации.

Для двухсуппортных токарных станков, оснащенных микропроцессорным устройством ЧПУ с функцией независимого управления координатными перемещениями, резервы повышения эффективности находятся в рациональном совмещении обработки поверхностей заготовки при общей частоте вращения шпинделя. Однако обработка двумя режущими инструментами, установленными на различных суппортах станка, производится главным образом в режиме последовательного выполнения переходов. Совместная обработка двумя режущими инструментами выполняется только при черновой обработке. Причем черновые переходы с включением в процесс резания кинематической нестабильности выполняются последовательно. Вместе с тем представляется, что повышения эффективности использования двухсуппортных токарных станков с ЧПУ можно добиться за счет расширения состава технологических переходов, макроопределений и циклов, выполняемых совместно. В первую очередь это относится к обоснованному совмещению чистовой обработки с черновой.

В существующих отечественных и зарубежных системах автоматизированного программирования решение задачи совмещения технологических переходов для двухсуппортных токарных станков осуществляется в ручном режиме на основе метода проб и ошибок. Это свидетельствует об отсутствии научно обоснованной методики, включающей процедуры оптимизационного выбора структурных компонентов операции механической обработки на двухсуппортных токарных станках с ЧПУ, что не позволяет в полной мере автоматизировать проектирование эффективных управляющих программ (УП).

Поэтому разработка технологического обеспечения автоматизированного синтеза оптимальной операции на двухсуппортных токарных станках с ЧПУ является актуальной.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами

В основу работы положены результаты исследований, выполненных автором в рамках ГПНИ «Функциональные и машиностроительные материалы и технологии, наноматериалы и нанотехнологии в современной технике» (2011–2015 гг.), задание «Разработка теоретических и технологических основ обеспечения заданного качества при изготовлении, сборке, упрочнении и восстановлении деталей машин» (2011-2015гг., ГБ 11-226).

Цель и задачи исследования

Целью исследования является разработка технологического обеспечения автоматизированного проектирования операции механической обработки на двухсуппортных токарных станках с ЧПУ, обеспечивающего повышение производительности и снижение себестоимости изготовления деталей при заданных параметрах качества и стойкости режущего инструмента.

Для достижения поставленной цели требуется решить следующие задачи:

- установить множество допустимых вариантов совмещения переходов, макроопределений и циклов, выполняемых на двухсуппортных токарных станках с ЧПУ, обосновать возможность совмещения черновых и чистовых рабочих ходов;
- разработать методы представления информации о двухсуппортных токарных станках с ЧПУ и изготавливаемых на них деталях;
- создать структурную модель совместного использования режущего инструмента при независимом управлении координатными перемещениями на двухсуппортных токарных станках с ЧПУ;
- исследовать качество обработки и стойкость режущего инструмента при различных вариантах совмещения технологических переходов, макроопределений и циклов;
- разработать математическую модель и на ее основе программный модуль оптимизации режимов резания при совместной обработке двумя режущими инструментами, установленными на разных суппортах токарного станка с ЧПУ, в условиях независимого управления координатными перемещениями;
- на основе разработанного технологического обеспечения создать и внедрить в производство систему автоматизированного проектирования операции механической обработки на двухсуппортных токарных станках с ЧПУ.

Научная новизна

Научная новизна работы состоит:

- в разработке моделей и алгоритмов автоматизированного синтеза технологических операций на двухсуппортных токарных станках, оснащенных устройством ЧПУ с функцией независимого управления координатными перемещениями, отличающихся инвариантностью в отношении кинематических особенностей выполняемых на станке макроопределений, циклов и переходов и позволяющих создавать технологические операции с оптимальными совмещениями рабочих ходов и оптимальными режимами резания;
- в создании метода прогнозирования упругих перемещений технологических подсистем токарного станка с ЧПУ при обработке совместно двумя режущими инструментами, установленными на разных суппортах, учитывающего кинематические особенности выполняемых переходов, макроопределений и циклов, позволяющего построить ограничение по точности обработки для определения оптимальных режимов резания при любом варианте совмещения переходов;
- в экспериментально установленных зависимостях для определения параметров качества поверхности (точности размеров и формы, шероховатости), обработанной точением двумя резцами, установленными на разных суппортах станка, с включением в один из выполняемых совместно процессов резания кинематической неустойчивости, позволяющих сформировать технические ограничения по точности обработки и шероховатости поверхности на этапе расчета режимов резания для совмещенных рабочих ходов;

– в разработке математической модели оптимизации режимов резания при совместной обработке двумя режущими инструментами, установленными на разных суппортах токарного станка с ЧПУ, отличающейся универсальностью в формировании состава технических ограничений для совмещенных рабочих ходов с учетом их кинематических особенностей и позволяющей повысить эффективность использования двухсуппортных токарных станков с ЧПУ.

Положения, выносимые на защиту

1. Модели и алгоритмы представления информации о двухсуппортных токарных станках с ЧПУ и изготавливаемых на них деталей, отличающиеся наличием функции включения в структуру проектируемой технологической операции циклов многонаправленной токарной обработки (МТО) и переходов с управляемой кинематической нестабильностью, позволяющие расширить номенклатуру вариантов совмещения переходов.

2. Модели и алгоритмы формирования массива оптимальных вариантов совмещения переходов и режущих инструментов для их реализации, отличающиеся инвариантностью в отношении кинематических особенностей выполняемых макроопределений, циклов и переходов, позволяющие расширить технологические возможности двухсуппортных токарных станков с ЧПУ.

3. Метод прогнозирования упругих перемещений технологических подсистем токарного станка с ЧПУ в направлении выполняемого размера при обработке заготовки совместно двумя режущими инструментами, установленными на разных суппортах, учитывающий кинематические особенности совмещаемых технологических переходов, макроопределений и циклов, позволяющий создать технические ограничения по точности обработки для определения оптимальных режимов резания при любом варианте совмещения переходов.

4. Экспериментально установленные зависимости для определения параметров качества поверхности (точность размеров и формы, шероховатость), обработанных точением двумя резцами, установленными на разных суппортах, с включением в один из выполняемых совместно процессов резания кинематической нестабильности, и стойкости режущего инструмента при МТО, позволяющие сформировать технические ограничения по точности обработки, шероховатости поверхности и стойкости режущего инструмента на этапе расчета режимов резания для совмещенных рабочих ходов.

5. Математическая модель оптимизации режимов резания при совместной обработке двумя режущими инструментами, установленными на разных суппортах токарного станка с ЧПУ, отличающаяся универсальностью в формировании состава технических ограничений для совмещенных рабочих ходов с учетом их кинематических особенностей и позволяющая повысить производительность двухсуппортных токарных станков с ЧПУ при заданных параметрах качества обработки.

Личный вклад соискателя ученой степени

Автором разработаны модели и алгоритмы автоматизированного синтеза операции механической обработки оптимальной структуры. Разработана методика оптимизации режимов резания при различных вариантах совмещения технологических переходов. Получены статистические зависимости для определения параметров качества обработанных поверхностей и стойкости режущего инструмента при

различных вариантах совмещения. Разработана программная система для автоматизированного синтеза оптимальной операции.

Шелег В.К., Дубина Л.М., Шпак А.В. принимали участие в разработке программных модулей, реализующих алгоритмы синтеза структуры операции и алгоритмы оптимизации режимов резания. Артанович Д.Е., Романенко В.И., Шут Е.Д. оказывали практическую помощь при внедрении в производство результатов выполненных теоретических и экспериментальных исследований.

Каштальян И.А. осуществлял консультации и оказывал практическую помощь на всех этапах выполнения данной работы.

Апробация результатов диссертации и информации об использовании результатов

Основные положения и результаты диссертации доложены и обсуждены на следующих семинарах и международных научно-технических конференциях (НТК): республиканском научно-практическом семинаре «Автоматизация и роботизация процессов и производств» (Минск, 2014 г.); международной НТК «Технология-оборудование-инструмент-качество» (Минск, 2014 г., 2016 г. 2018 г.); «Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта» (Санкт-Петербург, 2015 г.); «Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении» (Минск, 2015 г., 2018 г.); «АДП – 2016» (Созопол, Болгария, 2016 г.); «Инновации в машиностроении – 2017» (Минск, 2017 г.); «Инновационные технологии в машиностроении» (Новополоцк, 2018 г.).

Разработанная на основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований система автоматизированного проектирования операции механической обработки на двухсуппортных токарных станках с ЧПУ апробирована в производственных условиях ОАО «Минский завод автоматических линии им. П.М. Машерова».

Опубликование результатов диссертации

По теме диссертации опубликована 21 научная работа, в том числе 6 статей, соответствующих пункту 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь (общий объем 2,21 авторских листа), 8 статей в сборниках научных трудов и материалов конференций, 7 в сборниках тезисов докладов на конференциях.

Структура и объем диссертации

Диссертационная работа состоит из введения, общей характеристики работы, пяти глав, заключения, списка использованных источников и приложений. Полный объем диссертации составляет 203 страницы. Работа содержит 138 страниц машинописного текста, 58 рисунков, 18 таблиц, список использованных источников в количестве 114 наименований на 9 страницах, включая 21 авторскую работу, и 16 приложений на 64 страницах. Приложения содержат результаты исследований, листинги программ, акты о практическом использовании результатов работы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе выполнен анализ состава и структуры технологических переходов, макроопределений и циклов, выполняемых при токарной обработке на станках с ЧПУ, обоснованы цель и задачи исследований.

Показано, что создание оптимальной операции возможно на основе согласования конструкторско-технологических характеристик изготавливаемых деталей, технических возможностей оборудования и картежа сочетания переходов, из которых могут состоять различные операции. Для токарных станков с ЧПУ, оснащенных двумя суппортами с функцией независимого управления, резервы повышения их эффективного использования находятся в рациональном совмещении обработки поверхностей заготовки при общей частоте вращения шпинделя. Установлены существующие варианты использования типовых технологических переходов, макроопределений и циклов в режиме последовательной и совместной обработки двумя суппортами. Показано, что типовые схемы движения инструмента «петля», «зигзаг», «виток», «спуск» применяют на двухсуппортных токарных станках с ЧПУ в режиме последовательного участия режущих инструментов в процессе формообразования детали. Технологические переходы с включением в процесс резания кинематической нестабильности выполняются при черновой обработке последовательно. Существующие циклы и макроопределения обработки закрытых поверхностей вращения двумя резами построены с ориентацией на последовательную работу резцов по удалению припуска. При совместной работе двумя суппортами практически не используются схемы многонаправленной токарной обработки и циклы с включением в процесс резания кинематической нестабильности. Установлено, что нет научно обоснованной методики автоматизированного проектирования, включающей процедуры оптимизационного выбора структурных компонентов операции механической обработки на двухсуппортных станках с ЧПУ и расчета ее выходных параметров. В связи с этим, несмотря на наличие современных отечественных и зарубежных систем автоматизированного программирования (АДАМ, DELCAM, T-FLEX, КОМПАС и др.), при разработке управляющих программ для двухсуппортных станков до сих пор используется «ручное» проектирование на основе малоэффективного метода проб и ошибок. Сделан вывод, что разработка технологического обеспечения и создание на его основе программного продукта, реализующего функцию автоматизированного синтеза оптимальной операции для двухсуппортных токарных станков с ЧПУ с независимым управлением суппортами, позволит повысить эффективность их использования в условиях многономенклатурного серийного производства.

Во второй главе представлены модели и алгоритмы автоматизированного синтеза структуры операции, выполняемой на двухсуппортном токарном станке с ЧПУ. Приведены структурные модели представления информации о двухсуппортных токарных станках с ЧПУ и изготавливаемых на них деталях. Описана структурная модель совместного использования режущих инструментов при независимом управлении координатными перемещениями на двухсуппортных токарных станках с ЧПУ. Последовательность автоматизированного синтеза заключается в следующем (рисунок 1).

На первом этапе синтеза формируется описание информации о детали и информации о технологическом потенциале станка с ЧПУ, на котором данная деталь будет изготовлена. Описание информации о детали представляется в виде массива, который включает следующие поля: код поверхности, вид поверхности, качество, шероховатость, наибольший и наименьший диаметры, длина поверхности, припуск на обработку. Информация о технологическом потенциале (ТП) двухсуппортного

токарного станка с ЧПУ представлена в виде массива, состоящего из трех подмассивов. В первом подмассиве содержатся сведения о составе технологических переходов, которые могут быть выполнены на определенном станке. Второй подмассив содержит данные о кинематических особенностях рабочих ходов, составляющих структуру перехода. В третьем подмассиве представлены данные о режущих инструментах, которые могут быть использованы при изготовлении деталей на станке данной модели.



Рисунок 1 – Структурная схема автоматизированного синтеза операции

Структурная модель технологического потенциала (СМТП) двухшуппортного токарного станка с ЧПУ представлена в виде треугольной матрицы смежности. Возможные сочетания технологических рабочих ходов в данной матрице отражаются коэффициентами значимости от 0 до 1. Для технологических рабочих ходов, которые не могут быть совмещены (например, сверление и зенкерование отверстия), коэффициент значимости равен 0.

После представления информации о детали и о составе технологических переходов (первый подмассив) выполняется ее анализ:

для каждой поверхности определяется необходимость чистовой обработки; устанавливается число черновых и чистовых рабочих ходов; для каждого рабочего хода выполняется расчет основного времени обработки по приближенным формулам. Необходимость чистового рабочего хода определяется в зависимости от точности и шероховатости обрабатываемой поверхности. Требуемое число рабочих ходов рассчитывается как результат деления припуска на максимальную (допустимую) для обработки рассматриваемой поверхности глубину резания. Результатом анализа исходных данных является массив рабочих ходов (MPX).

На следующем этапе синтеза структуры операции на основе МРХ создается массив МРХ1, в котором для каждого рабочего хода указан код его технологической особенности. Далее выполняется анализ рабочих ходов, представленных в МРХ1, на соответствие множеству переходов в СМТП станка. Результатом анализа является новый информационный массив МРХ2, в котором каждый рабочий ход имеет код соответствующего перехода в СМТП станка.

Очередной этап синтеза связан с созданием структурной модели операции (СМО), которая так же, как и СМТП станка, представляет собой треугольную матрицу смежности. Исходными данными для составления СМО является СМТП станка и МРХ2, который содержит полный перечень рабочих ходов, необходимых для обработки заготовки с указанием времени выполнения рабочего хода, кода поверхности, над которой он выполняется, и типа режущего инструмента. При создании СМО коэффициенты значимости выбираются из СМТП станка для каждого сочетания переходов, перечисленных в ней.

На заключительном этапе синтеза создается структурная модель совмещения рабочих ходов. В основу модели совмещения рабочих ходов положена структурная модель представления информации о детали (описание детали) и СМО. Варианты совмещения рабочих ходов устанавливаются посредством ряда проверок, которые учитывают возможный порядок их реализации с учетом пространственных ограничений и типовых рекомендаций по размещению отдельных переходов в структуре технологической операции. Дополнительно проводится анализ вариантов режимов резания из множества допустимых с учетом ограничений, отражающих совместную реализацию технологических переходов (рабочих ходов). Далее формируется множество вариантов последовательностей всех технологических переходов, образующих структуру операции. Окончательный выбор структуры технологической операции производится по критериям, отражающим экономическую эффективность выполнения обработки. Распределение технологических переходов по суппортам осуществляется на этапе выбора режущего инструмента.

В третьей главе изложены исследования качества обработки поверхностей деталей и стойкости режущего инструмента при различных вариантах совмещения переходов.

Показано, что наибольший эффект от совместного точения двумя резцами, установленными на разных суппортах, может быть получен при изготовлении нежестких деталей. Настройку резцов при этом осуществляют по одной из известных схем: с делением глубины резания; с делением подачи. Указанные схемы совместного точения двумя резцами имеют один общий недостаток, который связан с возникновением вибраций вследствие взаимного влияния реализуемых процессов резания друг на друга. Для исключения этого недостатка предложено управлять виброустойчивостью технологической системы путем включения в один из процессов резания модулированной подачи в функции пути. При этом происходит изменение механизма формирования упругих деформаций технологической системы и их влияния на точность обработки. Однако существующие аналитические методы прогнозирования точности обработки не учитывают все возможные варианты совмещения технологических переходов. Данная задача в настоящей работе решена на основе численно-аналитических методов прогнозирования с использованием библиотеки расчетных схем упругих перемещений (рисунок 2).

Фактически точность выполняемых размеров и погрешность формы поверхности определяются механикой силового взаимодействия режущего инструмента и обрабатываемой заготовки. При совместной обработке двумя режущими инструментами, установленными на разных суппортах двухсуппортного токарного станка с ЧПУ, это взаимодействие имеет некоторые особенности, которые обусловлены взаимовлиянием друг на друга различных процессов резания. Причем степень этого взаимовлияния на формирование поля рассеяния выполняемого размера (размеров) в значительной мере определяется схемой совмещения переходов, при выборе и анализе которой следует руководствоваться следующими основными соображениями. 1. Технологическая система рассматривается состоящей из трех подсистем: подсистема 0 (шпиндель-патрон-заготовка); подсистема 1 (правый суппорт-державка-инструмент); подсистема 2 (левый суппорт-державка-инструмент). 2. Оба суппорта равноценны по своим функциональным возможностям. 3. Суппорт, на котором установлен режущий инструмент, формирующий выполняемый размер, принимается за основной. Дополнительным будет считаться тот суппорт, который влияет на искажение выполняемого размера через воздействие на заготовку. 4. Искажение выполняемого размера формируется векторным сложением трех перемещений: перемещения подсистемы основного суппорта и двух перемещений подсистемы заготовки (от действия силы резания инструмента, установленного на основном и дополнительном суппортах).

Для прогнозирования вариантов совмещения предложено производить декомпозицию двухинструментальной технологической системы на две одноинструментальные (для правого и левого суппортов). Фактически три подсистемы, входящие в состав двухинструментальной технологической системы, делятся на две группы одноинструментальных подсистем. Причем подсистема 0 (шпиндель-патрон-заготовка) в равной степени относится к подсистемам первой и второй группы (первая группа – подсистемы 1, 2; вторая группа – подсистемы 0, 2).

Каждая из подсистем (рисунок 2) в определенной степени влияет на искажение выполняемого размера. В результате расчетное значение диаметра заготовки D_p не совпадает с его фактическим значением D_Φ .

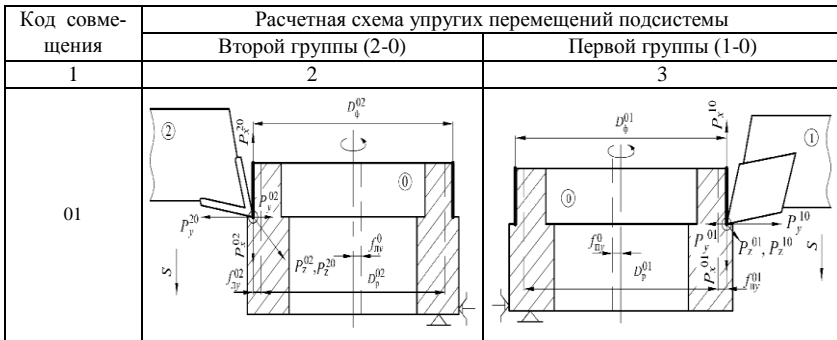


Рисунок 2 – Фрагмент библиотеки расчетных схем упругих перемещений

Поскольку в пространстве тело имеет шесть степеней свободы, то характеристики податливости технологических подсистем 0,1,2 могут быть представлены в виде матриц $\omega^0, \omega^1, \omega^2$ соответственно.

$$\omega^0 = \begin{Bmatrix} \omega_{xx}^0 & \omega_{xy}^0 & \omega_{xz}^0 \\ \omega_{yx}^0 & \omega_{yy}^0 & \omega_{yz}^0 \\ \omega_{zx}^0 & \omega_{zy}^0 & \omega_{zz}^0 \end{Bmatrix}; \omega^1 = \begin{Bmatrix} \omega_{xx}^1 & \omega_{xy}^1 & \omega_{xz}^1 \\ \omega_{yx}^1 & \omega_{yy}^1 & \omega_{yz}^1 \\ \omega_{zx}^1 & \omega_{zy}^1 & \omega_{zz}^1 \end{Bmatrix}; \omega^2 = \begin{Bmatrix} \omega_{xx}^2 & \omega_{xy}^2 & \omega_{xz}^2 \\ \omega_{yx}^2 & \omega_{yy}^2 & \omega_{yz}^2 \\ \omega_{zx}^2 & \omega_{zy}^2 & \omega_{zz}^2 \end{Bmatrix}$$

В строках матриц указаны соответствующие перемещения от единичных сил P_x, P_y, P_z в направлении осей x, y, z .

Используя матрицы податливости ω^0, ω^1 и ω^2 , получили зависимости для пространственных перемещений \bar{f}_n^0 и \bar{f}_n^1 в подсистеме 0, а также \bar{f}_n^1 и \bar{f}_n^2 в подсистемах 1 и 2 соответственно: $\bar{f}_n^0 = \omega^0 P^{01}$; $\bar{f}_n^1 = \omega^1 P^{10}$; $\bar{f}_n^2 = \omega^2 P^{20}$,

где P^{01} и P^{02} – сила воздействия подсистемы 1 и подсистемы 2 на подсистему 0; P^{10} и P^{20} – сила воздействия подсистемы 0 на подсистему 1 и 2 соответственно.

Поскольку $\bar{P}^{01} = -\bar{P}^{10} = \bar{P}_n$, а $\bar{P}^{02} = -\bar{P}^{20} = \bar{P}_n$, то для суммарного перемещения \bar{f}_n^{01} вершины реза, установленного на правом суппорте, относительно оси заготовки можно записать: $\bar{f}_n^{01} = \bar{f}_n^1 - \bar{f}_n^0 = \omega^1 \bar{P}^{10} - \omega^0 \bar{P}^{01} = (\omega^1 + \omega^0) \bar{P}_n$.

Аналогично для вершины реза, установленного на левом суппорте, суммарное перемещение \bar{f}_n^{02} будет равно: $\bar{f}_n^{02} = \bar{f}_n^2 - \bar{f}_n^0 = \omega^2 \bar{P}^{20} - \omega^0 \bar{P}^{02} = (\omega^2 + \omega^0) \bar{P}_n$.

Для определения суммарного перемещения вершины реза, установленного на одном из суппортов станка, целесообразно ввести объединенную матрицу податливости ω^{01} для первой группы подсистем ($\omega^{01} = \omega^1 + \omega^0$) и объединенную матрицу податливости ω^{02} для подсистем второй группы ($\omega^{02} = \omega^2 + \omega^0$).

Тогда уравнения, используемые для определения $\bar{f}_n^0, \bar{f}_n^1, \bar{f}_n^{01}, \bar{f}_n^{02}$, примут вид: $\bar{f}_n^0 = \omega^0 \bar{P}_n$; $\bar{f}_n^1 = \omega^1 \bar{P}_n$; $\bar{f}_n^{01} = \omega^{01} \bar{P}_n$; $\bar{f}_n^{02} = \omega^{02} \bar{P}_n$.

Представленные матричные уравнения определения податливости положены в основу метода прогнозирования точности обработки при решении задачи выбора оптимального варианта совмещения технологических переходов на двухсуппортных токарных станках с ЧПУ. Обобщенный алгоритм определения максимального и минимального значений искажения размеров при этом заключается в следующем: 1) на основе экспериментальных данных строятся матрицы податливости $\omega^0, \omega^1, \omega^2$ для подсистем 0, 1, 2 токарного станка с ЧПУ соответственно; 2) строятся объединенные матрицы податливости ω^{01} для правого и ω^{02} для левого суппорта; 3) формируется массив допустимых схем совмещения при совместной обработке заготовки двумя режущими инструментами; 4) в соответствии с выбранной схемой совмещения определяется, какая из двух групп технологических подсистем является основной (основной суппорт), а какая дополнительной; 5) для выбранного варианта совмещения строится вектор силы резания для правого \bar{P}_n и левого

$\overline{P}_л$ суппорта; 6) определяется вектор перемещения контактной точки реза с обрабатываемой поверхностью в направлении выполняемого размера от силового взаимодействия подсистем основного суппорта с подсистемой шпинделя ($f_{п}^{01}$ или $f_{л}^{02}$); 7) определяется вектор перемещения шпиндельного узла в направлении размера, выполняемого основным суппортом, от силы воздействия на него подсистемы дополнительного суппорта; 8) определяется результирующее перемещение контактной точки реза в направлении размера, выполняемого основным суппортом (выполняется процедура сложения векторов по п. 6 и п. 7).

Результаты экспериментальных исследований качества обработки поверхностей деталей и стойкости режущего инструмента при различных вариантах совмещения переходов заключаются в следующем.

Установлено, что при точении двумя резами совместно с делением глубины резания (таблица) точность диаметральных размеров выше для варианта выполнения чернового рабочего хода с модулированной подачей (соответствует 8-му квалитету, что соответствует прогнозируемой оценке точности обработки, полученной по представленному в работе методу). Погрешности формы поверхностей деталей, обработанных двумя резами совместно, от схемы выполнения чернового рабочего хода практически не зависят. Данное явление обусловлено снижением уровня вибраций технологической системы за счет уменьшения вероятности возникновения резонансных явлений при наложении друг на друга однородных процессов резания. Для токарных станков с независимым управлением суппортами это выражается в возможности создания схем совмещения, обеспечивающих повышение производительности и точности обработки при изготовлении нежестких деталей.

Таблица – Статистические характеристики погрешностей размеров и формы деталей, изготовленных на двухсуппортных токарных станках с ЧПУ

Контролируемый параметр	Характеристика схемы обработки при точении двумя резами с делением глубины резания	\overline{X} , мм	S^2 , мм
Диаметральный размер	Черновой и чистовой рабочие хода выполнены последовательно.	0,0167	0,0084
	Черновой рабочий ход выполнен с модулированной подачей совместно с чистовым рабочим ходом.	0,0168	0,0086
	Оба рабочих хода выполнены совместно с постоянной подачей.	0,0182	0,0091
Продольный размер	Черновой и чистовой рабочие хода выполнены последовательно.	0,0129	0,0059
	Черновой рабочий ход выполнен с модулированной подачей совместно с чистовым рабочим ходом.	0,0133	0,0059
	Оба рабочих хода выполнены совместно с постоянной подачей.	0,0131	0,0060
Форма в поперечном сечении	Черновой и чистовой рабочие хода выполнены последовательно.	0,0021	0,0008
	Черновой рабочий ход выполнен с модулированной подачей совместно с чистовым рабочим ходом.	0,0022	0,00091
	Оба рабочих хода выполнены совместно с постоянной подачей.	0,0024	0,0009

Установлено, что при точении двумя резами совместно с делением глубины резания, значения параметра шероховатости Ra на 10-12 % меньше для варианта выполнения чернового рабочего хода с модулированной подачей. Данное явление можно объяснить тем, что при обработке двумя резами одновременно взаимодействуют два нестационарных по своей природе процесса резания. При этом проявляются резонансные явления, что приводит к возникновению вибраций и как следствие к увели-

чению шероховатости обработанной поверхности. Это подтверждается результатами выполненных исследований: шероховатость поверхности, обработанной двумя резами последовательно, значительно ниже шероховатости поверхности, обработанной двумя резами совместно; в случае выполнения черногового рабочего хода с включением в процесс резания кинематической неустойчивости в результате наложения асинхронной силы, возникающей при изменении подачи, на систему, находящуюся в колебательном движении, колебания гасятся, шероховатость обработанной поверхности при этом уменьшается. Анализ ряда волнограмм показал, что при обработке с модулированной подачей высота продольной волнистости также на 10-15 % меньше, чем при обработке с постоянной подачей, равной среднему значению модулированной.

Исследование шероховатости поверхности, обработанной точением с делением подачи и включением в процесс резания одним из резцов кинематической неустойчивости, выполнялось по методу полного факторного эксперимента ^{2,3}. Получена зависимость для определения параметра шероховатости Ra .

$$Ra = 1,27 + 2,26S_o - 0,25K_M + 0,03l_1.$$

Анализ полученной статистической модели показывает, что наибольшее влияние на шероховатость обработанной поверхности оказывает значение подачи S_o , с которой перемещается левый суппорт (с ее увеличением шероховатость возрастает). Меньше влияет на величину микронеровностей коэффициент K_M модулированного изменения подачи резца, установленного на правом суппорте. При его уменьшении шероховатость обработанной поверхности увеличивается. Длина пути разгона-замедления l_1 в интервале от 0,4 до 1,2 мм на шероховатость обработанной поверхности влияет незначительно и может назначаться только из условия повышения уровня виброустойчивости технологической системы.

Получена зависимость для определения относительного размерного износа резцов для МТО при обработке конструкционной стали 40Х (материал режущей части резца – твердый сплав Т15К6).

$$h_0 = 0,312t^{0,018} v^{0,665} S_{o_n}^{0,055} K_{S_o}^{-0,005} K_{L_p}^{-0,025},$$

где t – глубина резания, мм; v – скорость резания, м/мин; S_{o_n} – продольная подача, мм/об; K_{S_o} – отношение продольной подачи S_2 к поперечной подаче S_1 ; K_{L_p} – отношение пути резания с продольной подачей L_{p_n} к длине резания с подачей врезания L_{p_a} .

Анализ представленной зависимости показывает, что наибольшее влияние на размерную стойкость оказывает скорость резания. Из параметров, характеризующих МТО, наибольшее влияние на размерную стойкость оказывает соотношение пути резания в продольном и поперечном направлениях.

В четвертой главе представлена математическая модель оптимизации режимов резания при различных вариантах совмещения переходов.

В качестве искоемых (управляемых) параметров приняты: частота вращения шпинделя $n_{ш}$, подача на оборот режущего инструмента, установленного на пер-

вом (правом) суппорте, S_{O_1} и режущего инструмента, установленного на втором (левом) суппорте, S_{O_2} . В качестве критерия оптимизации использован показатель максимальной производительности. Наиболее важными ограничениями при выборе режимов резания для совмещенных переходов являются: наименьшая и наибольшая частота вращения шпинделя и минутная подача, допустимые кинематикой станка; стойкость режущего инструмента; мощность электродвигателя привода главного движения; прочность и жесткость режущего инструмента; точность обработки; шероховатость обработанной поверхности.

Ограничения 1 и 2. Наименьшая и наибольшая допустимые минутные подачи:

$$n_{\text{ш}} S_{O_1} \geq S_1 \min; \quad n_{\text{ш}} S_{O_2} \geq S_2 \min; \quad n_{\text{ш}} S_{O_1} \leq S_1 \max; \quad n_{\text{ш}} S_{O_2} \leq S_2 \max,$$

где S_{O_1} , S_{O_2} – минутная подача первого и второго суппорта соответственно, мм/об; $n_{\text{ш}}$ – частота вращения шпинделя, мин⁻¹; $S_1 \min$, $S_1 \max$, $S_2 \min$, $S_2 \max$ – минимальная и максимальная подача, допускаемая кинематикой станка, первого и второго суппорта соответственно мм/мин.

Ограничение 3 и 4. Наименьшая и наибольшая допустимые частоты вращения шпинделя: $n_{\text{ш}} \geq n_{\text{ш}} \min$; $n_{\text{ш}} \leq n_{\text{ш}} \max$,

где $n_{\text{ш}} \min$, $n_{\text{ш}} \max$ – соответственно минимальная и максимальная частота вращения шпинделя, допускаемая кинематикой станка, мин⁻¹.

Ограничение 5. Стойкость режущего инструмента соответственно при точении (расточивании) первым и вторым суппортом, рассверливании и зенкерования:

$$n_{\text{ш}} S_{O_1}^{y_1} \leq \frac{1000 C_{v_1} K_{v_1}}{\pi D_1 T_1^{m_1} t_1^{x_1}}; \quad n_{\text{ш}} S_{O_2}^{y_2} \leq \frac{1000 C_{v_2} K_{v_2}}{\pi D_2 T_2^{m_2} t_2^{x_2}}; \quad n_{\text{ш}} S_{O_c}^{y_c} \leq \frac{1000 C_{v_c} D_n^{q_c-1} K_{v_c}}{\pi T_c^{m_c}}; \quad n_{\text{ш}} S_{O_3}^{y_3} \leq \frac{1000 C_{v_3} D_n^{q_3-1} K_{v_3}}{\pi T_3^{m_3} t_3^{x_3}},$$

где C_{v_1} , K_{v_1} , m_1 , x_1 , y_1 , C_{v_2} , K_{v_2} , m_2 , x_2 , y_2 , C_{v_c} , K_{v_c} , m_c , y_c , q_c , C_{v_3} , K_{v_3} , m_3 , y_3 , q_3 – экспериментальные коэффициенты и показатели степени для рабочего хода, выполняемого резцом, установленным на первом и втором суппорте, сверления и рассверливания (зенкерования), устанавливаемые на первом или втором суппорте соответственно; D_1, D_2 – диаметры обработки резцами, установленными на первом и втором суппорте, соответственно, мм; T_1, T_2, T_c, T_3 – стойкость резца, установленного на первом и втором суппорте, сверла при сверлении в сплошном металле и зенкера (или сверла при рассверливании) соответственно, мин; D_n – диаметр сверла (зенкера), мм; t_1, t_2, t_3 – глубина резания при точении резцом, установленным на первом и втором суппорте соответственно, и при зенкерования, мм; S_{O_1} , S_{O_2} , S_{O_c} , S_{O_3} – подача на оборот при точении резцом, установленным на первом суппорте, резцом, установленным на втором суппорте, сверлении и рассверливании (зенкерования) соответственно мм/об.

Ограничение 6. Мощность электродвигателя привода главного движения станка. Возможны различные варианты совмещения.

Вариант 1. Обработка заготовки выполняется двумя резцами, установленными на разных суппортах.

$$n_{ш} (S_{O_1}^{y_{P_1}} + S_{O_2}^{y_{P_2}}) \leq 1020 \cdot 60 \cdot 1000 N_{\Pi} \eta \left(\frac{1}{10 C_{P_1} t^{x_{P_1}} K_{P_1} \pi D_1} + \frac{1}{10 C_{P_2} t^{x_{P_2}} K_{P_2} \pi D_2} \right),$$

где N_{Π} – мощность электродвигателя привода главного движения станка, кВт; η – коэффициент полезного действия механизма передачи от электродвигателя к рабочему органу; $C_{P_1}, K_{P_1}, x_{P_1}, y_{P_1}, C_{P_2}, K_{P_2}, x_{P_2}, y_{P_2}$, – экспериментальные коэффициенты и показатели степени для процесса обработки режущим инструментом, установленным на первом и втором суппорте, соответственно.

Вариант 2. Обработка выполняется резцом (установлен на первом суппорте) и сверлом (установлен на втором суппорте).

$$n_{ш} (S_{O_1}^{y_{P_1}} + S_{O_2}^{y_{M_2}}) \leq N_{\Pi} \eta \left(\frac{1020 \cdot 60 \cdot 1000}{10 C_{P_1} t^{x_{P_1}} K_{P_1} \pi D_1} + \frac{9750}{10 C_{M_2} K_{M_2} D_{ш}^{q_{M_2}}} \right),$$

где $C_{M_2}, K_{M_2}, q_{M_2}, y_{M_2}, C_{M_3}, K_{M_3}, x_{M_3}, y_{M_3}$ – экспериментальные коэффициенты и показатели степени, учитывающие свойства обрабатываемого материала, вид обработки и материал режущей части инструмента при сверлении и рассверливании (зенкерование) соответственно.

Вариант 3. Обработка выполняется резцом и зенкером.

$$n_{ш} (S_{O_1}^{y_{P_1}} + S_{O_3}^{y_{M_3}}) \leq N_{\Pi} \eta \left(\frac{1020 \cdot 60 \cdot 1000}{10 C_{P_1} t^{x_{P_1}} K_{P_1} \pi D_1} + \frac{9750}{10 C_{M_3} t^{x_{M_3}} K_{M_3} D_{ш}^{q_{M_3}}} \right),$$

Ограничение 7. Прочность режущего инструмента.

$$n_{ш}^{z_{P_1}} S_1^{y_{P_1}} \leq \frac{1000^{z_{P_1}} \sigma_{и1} B_1 H_1^2}{6 \cdot 10 C_{P_1} t^{x_{P_1}} \pi^{z_{P_1}} D_1^{z_{P_1}} K_{P_1} l_{вр1} K_{зп1}}; \quad n_{ш}^{z_{P_2}} S_2^{y_{P_2}} \leq \frac{1000^{z_{P_2}} \sigma_{и2} B_2 H_2^2}{6 \cdot 10 C_{P_2} t^{x_{P_2}} \pi^{z_{P_2}} D_2^{z_{P_2}} K_{P_2} l_{вр2} K_{зп2}},$$

где $\sigma_{и1}, \sigma_{и2}$ – значение предела прочности при изгибе материала державки резцов, установленных на первом и втором суппорте, соответственно, Н/мм²; B_1, B_2 – ширина поперечного сечения державок резцов, установленных на первом и втором суппорте, соответственно, мм; H_1, H_2 – высота поперечного сечения державок резцов, установленных на первом и втором суппорте, соответственно, мм; $l_{вр1}, l_{вр2}$ – вылет резцов из резцедержателя для первого и второго суппорта соответственно, мм; $K_{зп1}, K_{зп2}$ – коэффициент запаса прочности для державок первого и второго резца, соответственно.

Ограничение 8. Точность обработки. Ограничения по точности диаметрального размера заготовки, образованного резцом, установленным на первом (правом) суппорте:

$$S_{O_1}^{y_{P_1}} n_{ш}^{z_{P_1}} \leq \frac{(1000)^{z_{P_1}} \alpha \delta_1^{01} (1 - k_{\Pi}^{01})}{10 k_{\Delta} \omega_{yy}^{01} C_{P_1} t^{x_{P_1}} \pi^{z_{P_1}} D_1^{z_{P_1}} K_{P_1}}; \quad S_{O_2}^{y_{P_2}} n_{ш}^{z_{P_2}} \leq \frac{(1000)^{z_{P_2}} \alpha \delta_{\Pi}^{01} k_{\Pi}^{01}}{10 k_{\Delta} \omega_{yy}^{01} C_{P_2} t^{x_{P_2}} \pi^{z_{P_2}} D_2^{z_{P_2}} K_{P_2}},$$

где α – коэффициент, выражающий допустимую долю погрешности обработки, зависящей от режимов резания в суммарной погрешности обработки ($\alpha = 0,5$); k_{Δ} –

коэффициент стабильности процесса резания; δ_1 и δ_2 – величина поля допуска исполняемого размера режущим инструментом, установленным на первом и втором суппорте, соответственно, мкм; δ_2^0 и δ_2^{02} – части поля допуска размера, выполняемого режущим инструментом, установленным на втором (левом) суппорте, которая относится к подсистеме 0 и группе подсистем 02, соответственно; P_{y1} и P_{y2} – радиальная составляющая силы резания режущим инструментом, установленным на первом (правом) и втором (левом) суппорте, соответственно; ω_{yy}^0 и ω_{yy}^{01} , ω_{yy}^{02} – податливость шпиндельного узла станка и подсистем первой (второй) группы в направлении действия радиальных составляющих сил резания, возникающих при точении резцом, установленным на первом (втором) суппорте, соответственно; $C_{P_y}, K_{P_y}, x_{P_y}, y_{P_y}, z_{P_y}$ – экспериментальные коэффициенты и показатели степени, учитывающие свойства обрабатываемого материала, вид обработки и материал режущей части инструмента.

Если выполняемый размер формируется резцом, установленным на втором (левом) суппорте, то ограничения по точности обработки будут представлены в виде следующих неравенств:

$$S_{O_2}^{y_{P_{y2}}} n_{ш}^{z_{P_{y2}}} \leq \frac{(1000)^{z_{P_{y2}}} \alpha \delta_2^{02} (1 - k_{ш}^{02})}{10k_{\Delta} \omega_{yy}^{02} C_{P_{y2}} t^{x_{P_{y2}}} \pi^{z_{P_{y2}}} D_2^{z_{P_{y2}}} K_{P_{y2}}}, \quad S_{O_1}^{y_{P_{y1}}} n_{ш}^{z_{P_{y1}}} \leq \frac{(1000)^{z_{P_{y1}}} \alpha \delta_2^0 k_{ш}^{02}}{10k_{\Delta} \omega_{yy}^{02} C_{P_{y1}} t^{x_{P_{y1}}} \pi^{z_{P_{y1}}} D_1^{z_{P_{y1}}} K_{P_{y1}}}$$

Ограничение 9. Требуемая шероховатость поверхности.

Получистовое (чистовое) точение, сверление, зенкерование (рассверливание) соответственно:

$$S_{O_1}^{k_1} n_{ш}^{-k_3} \leq \frac{(\pi D)^{k_3} r^{k_2} Ra}{k_0 (1000)^{k_3} (90^\circ + \gamma)^{k_4}}; \quad S_{O_1}^{k_{1c}} n_{ш}^{k_{3c}} \leq \frac{(1000)^{k_{3c}} Ra}{k_{0c} (\pi D_{ш})^{k_{3c}} D_{ш}^{q_c}}; \quad S_{O_1}^{k_{1s}} n_{ш}^{k_{3s}} \leq \frac{(1000)^{k_{3s}} D_{ш}^{q_s} Ra}{k_{0s} (\pi D_{ш})^{k_{3s}}}$$

где $\varphi, \varphi_1, \gamma, r$ – параметры геометрии режущей части инструмента; $k_0, k_1, k_2, \dots, k_7$ – экспериментально установленные коэффициент и показатели степени, зависящие от материала обрабатываемой заготовки и метода обработки.

Функция цели. При оптимизации режимов резания двух различных процессов резания, связанных общей частотой вращения заготовки, по трём параметрам $n_{ш}$, S_{O_1} и S_{O_2} функция цели может быть описана следующим выражением:

$$F = n_{ш} S_{O_1} S_{O_2} \rightarrow \max.$$

Для выполнения расчётов была использована надстройка *Microsoft Office Excel* «Поиск решения», которая позволяет получить решение поставленной нелинейной задачи оптимизации квазиньютоновским методом GRG (*generalized reduced gradient*).

При определении оптимальных режимов резания на основе разработанной математической модели вследствие множества возможных вариантов совмещения переходов возникает задача выбора совокупности параметров, входящих в состав технических ограничений. В связи с этим сформировано два массива, которые используются при расчете режимов резания для различных вариантов совмещения:

массив вариантов совмещений (МВС) и массив параметров технических ограничений (МПТО). Создана вычислительная процедура для формирования требуемого состава технических ограничений для каждого варианта совмещения переходов.

В пятой главе представлена информация по использованию разработанного технологического обеспечения при создании системы автоматизированного проектирования операции механической обработки на двухсуппортных токарных станках с ЧПУ.

На основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований разработано специальное программное обеспечение, которое интегрировано в систему *Auto_Combination*. В состав системы входят четыре программных модуля: модуль выбора оптимальных вариантов совмещений и вывода результатов в виде массива совмещенных рабочих ходов; модуль поиска и выбора режущих инструментов для вариантов совмещений, обозначенных в массиве; модуль расчета оптимальных режимов резания; модуль создания отчета в формате *xml* для транспортировки в систему *Pro/Engineer*. Язык программирования: *C#*, *Microsoft Visual Studio*. Тестирование программного обеспечения системы проведено на примере автоматизированного проектирования технологической операции, выполняемой на двухсуппортном токарном станке мод. 1А734ФЗ, оснащенный устройством ЧПУ с функцией независимого управления координатными перемещениями.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. В результате анализа особенностей механической обработки на токарных станках с ЧПУ установлено, что создание модели проектирования технологической операции оптимальной структуры возможно на основе согласования конструкторско-технологических характеристик изготавливаемых деталей, технических возможностей оборудования и картежа сочетания переходов, из которых могут состоять различные операции. Предложено создать специализированную модель, которая связывает структуру токарной операции с условиями и особенностями функционирования двухсупортного токарного станка с ЧПУ в оптимальном режиме. Показано, что для токарных станков с ЧПУ, оснащенных двумя суппортами с функцией независимого управления координатными перемещениями, резервы повышения их эффективного использования находятся в рациональном совмещении обработки поверхностей заготовки при общей частоте вращения шпинделя. При этом задача выбора оптимальных вариантов совмещения переходов в операции может быть решена на уровне макроопределения, цикла или рабочего хода [3, 8, 9, 10, 11, 13, 14].

2. Разработана структурная модель представления информации о деталях, обрабатываемых на двухсуппортных токарных станках с ЧПУ, отличающаяся наличием в ней данных о детали не только как о геометрическом объекте, но и как об объекте технологии (путем указания припуска на каждую из обрабатываемых поверхностей), что позволило в автоматизированном режиме создавать план обработки каждой элементарной поверхности детали с использованием укрупненного нормирования времени выполнения перехода. Создана структурная модель технологического потенциала (СМТП) токарного станка с ЧПУ с двумя независимо управляемыми суппортами и одним шпинделем, содержащая технологические переходы с включением в процесс резания кинематической нестабильности и поз-

воляющая с помощью коэффициентов значимости, определяемых методом экспертных оценок, установить приоритет для любого сочетания рабочих ходов, которые могут быть выполнены на станке [7, 11, 12, 15, 19].

3. На основе структурной модели технологического потенциала (СМТП) станка и информационного массива, содержащего полный перечень рабочих ходов, необходимых для обработки заготовки, с указанием времени выполнения каждого рабочего хода, кода обрабатываемой поверхности и типа режущего инструмента, создана структурная модель операции, позволяющая посредством ряда проверок, учитывающих пространственные отклонения и типовые рекомендации по размещению отдельных переходов в структуре операции, сформировать последовательность совмещенных рабочих ходов. В качестве критериев выбора оптимального сочетания переходов при этом использованы коэффициенты значимости, определяемые методом экспертных оценок, и рассчитанное укрупненным методом перекрываемое время обработки [8, 10, 11, 12].

4. В результате выполненных экспериментальных исследований выявлено, что использование разработанного метода прогнозирования упругих перемещений технологических подсистем двухсуппортного токарного станка с ЧПУ в направлении выполняемого размера, учитывающего особенности схемы установки и закрепления детали, а также кинематические особенности выполняемых переходов, макроопределений и циклов, на этапе назначения оптимальных режимов резания, позволяет обеспечить требуемую точность размеров, выполняемых при совместной обработке двумя режущими инструментами, установленными на разных суппортах станка [1, 4, 6, 9].

5. Экспериментально установлено, что вследствие повышения устойчивости технологической системы к автоколебаниям в процессе точения двумя резцами (совместно) с делением глубины резания и сообщением черновому резцу модулированной подачи точность диаметральных размеров обработанных заготовок возрастает и соответствует 8-му качеству, что согласуется с результатами прогнозирования точности обработки, полученными по представленному в работе методу; (погрешности формы поверхностей детали, обработанных двумя резцами совместно, от схемы выполнения чернового рабочего хода практически не зависят). В процессе точения двумя резцами (совместно) с делением глубины резания и сообщением черновому резцу модулированной подачи уменьшается шероховатость и продольная волнистость обработанной поверхности (параметр шероховатости Ra на 10-12 % ниже, чем при точении без включения в процесс резания модулированной подачи). Наибольшее влияние на шероховатость поверхности, обработанной двумя резцами с делением подачи, оказывает подача резца, совершающего равномерное движение (с ее увеличением наблюдается рост значений параметра Ra). Длина пути разгона-замедления в интервале от 0,4 до 1,2 мм на шероховатость обработанной поверхности влияет незначительно и может назначаться только из условия повышения уровня виброустойчивости технологической системы. Полученная статистическая модель размерной стойкости режущего инструмента при МТО может быть использована для автоматизированного расчета величины составляющей погрешности обработки, вызванной его износом [2, 5, 6, 17, 18].

6. Разработаны математическая модель и алгоритм оптимизации режимов резания на двухсуппортных токарных станках с ЧПУ, учитывающие особенности сов-

местной обработки двумя режущими инструментами с включением в один из процессов резания кинематической нестабильности (модулированной подачи), что позволило создать процедуру расчета режимов резания для каждого варианта совмещенных переходов и как следствие обеспечить повышение производительности обработки на 30-35 % [2, 5, 6, 16, 20, 21].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Разработанное технологическое обеспечение позволило создать систему автоматизированного проектирования операции механической обработки на двухсуппортных токарных станках с ЧПУ и внедрить в производство ОАО «Минский завод автоматических линии имени П.М. Машерова». Результаты выполненных исследований используются также в учебном процессе при подготовке студентов, магистрантов и аспирантов БНТУ по специальностям 1-36 01 01 – «Технология машиностроения» и 1-53 01 01 – «Автоматизация технологических процессов и производств».

Полученные научные результаты могут быть применены на любом машиностроительном предприятии, которое использует двухсуппортные токарные или токарно-карусельные станки с ЧПУ.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных журналах и сборниках

1. Каштальян, И.А. Дискретное управление процессами резания на токарных станках с числовым программным управлением / И.А. Каштальян, В.К. Шелег, Б. Орукари // *Весці НАН Беларусі, серыя фізіка-тэхн. навук.* – Минск, 2015. – № 4. – С. 115–126.
2. Каштальян, И.А. Стойкость режущего инструмента при многонаправленной токарной обработке на станках с числовым программным управлением / И.А. Каштальян, Б. Орукари, Л.М. Дубина // *Вестник ПГУ.* – Новополоцк, 2016, – № 3. – С. 31–37.
3. Орукари, Б. Анализ возможностей систем автоматизированного проектирования управляющих программ для токарных станков с ЧПУ / Б. Орукари // *Машиностроение: сб. науч. тр.* – Минск: БНТУ, 2017. – № 29. – С. 81–89.
4. Каштальян, И.А. Эффективные схемы обработки закрытых поверхностей вращения на токарных станках с числовым программным управлением / И.А. Каштальян, Б. Орукари // *Машиностроение: сб. науч. тр.* – Минск: БНТУ, 2017. – № 30. – С. 131–137.
5. Каштальян, И.А. Шероховатость и волнистость поверхностей деталей, обработанных на двухсуппортных токарных станках с ЧПУ / И.А. Каштальян, Б. Орукари // *Вестник ПГУ.* – Новополоцк, 2017. – № 3. – С. 9–15.
6. Каштальян, И.А. Точность размеров и формы деталей, изготовленных на двухсуппортных токарных станках с числовым программным управлением / И.А. Каштальян, В.К. Шелег, Б. Орукари // *Актуальные вопросы машиноведения: сб. науч. тр.* – Минск: ОИМ, 2017. – № 6. – С. 150–155.

Материалы конференций

7. Каштальян, И.А. Программная реализация функции независимого управления координатными перемещениями / И.А. Каштальян, В.К. Шелег, Б. Орукари // *Автоматизация и роботизация процессов и производств: материалы научно-*

практического семинара, Минск, 13 февраля 2014 г. / редкол.: Ф.И. Пантелеенко [и др.]. – Минск, 2014. – С. 33–35.

8. Каштальян, И.А. Автоматизированный синтез структуры цикла токарной обработки на станках с ЧПУ / И.А. Каштальян, Б. Орукари, Л.М. Дубина // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы научно-практической конференции, Минск, 15 февраля 2015 г. / редкол.: Ф.И. Пантелеенко [и др.]. – Минск, 2015. – С. 145–146.

9. Каштальян, И.А. Расширение технологических возможностей двухсуппортных токарных станков с числовым программным управлением / И.А. Каштальян, Б. Орукари // Технологии упрочнения, нанесения покрытий и ремонта: теория и практика: материалы междунар. науч.-практич. конф., Санкт-Петербург, 14–15 апреля 2016. – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2016. – С. 296–304.

10. Орукари, Б. Автоматизированное проектирование технологических операций, выполняемых на двухсуппортных токарных станках с ЧПУ / Б. Орукари // Наука – образованию, производству, экономике: материалы 14-й Международной научно-технической конф. – Минск: БНТУ, 2016. – Т. 1. – С. 450.

11. Orukari, B. Automated Synthesis of Operations Structures Performed on Four-axis CNC Lathes / B. Orukari, I. Kashtalyan, D. Artanovich // научни известия: XXV международна научно-техническа конференция, 23–26 юни 2016. – Созопол, 2016. – С. 311–318.

12. Каштальян, И.А. Автоматизированный синтез структуры операции, выполняемой на двухсуппортном токарном станке с ЧПУ / И.А. Каштальян, Б. Орукари, П.А. Августовский // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы научно-практической конференции, Минск, 1–2 марта 2018 г. / редкол.: А.М. Маляревич [и др.]. – Минск, 2018. – С. 51–53.

13. Каштальян, И.А. Адаптивная система управления виброустойчивостью процесса резания на двухсуппортном токарном станке с ЧПУ / И.А. Каштальян, Б. Орукари, Е.Д. Шут // Инновационные технологии, автоматизация и мехатроника в машино- и приборостроении: материалы научно-практической конференции, Минск, 1 – 2 марта 2018 г. / редкол.: А.М. Маляревич [и др.]. – Минск, 2018. – С. 54–56.

14. Каштальян, И. А. Резервы повышения эффективности использования двухсуппортных токарных станков с ЧПУ / И. А. Каштальян, Б. Орукари, А. В. Шпак // Инновационные технологии в машиностроении: эл. сб. материалов международной научно-техн. конф., Новополоцк, 19–20 апреля 2018 г. / редкол.: В. К. Шелег [и др.]. Новополоцк, 2018. – С. 78–80.

Тезисы докладов

15. Каштальян, И.А. Структурная модель представления информации о деталях, обрабатываемых на двухсуппортных токарных станках с ЧПУ / И.А. Каштальян, Б. Орукари, Л.М. Дубина // Технология – оборудование – инструмент – качество: тез. докл. междунар. науч.-практич. конф., Минск, 9–10 апреля 2014 г. / редкол.: В.К. Шелег [и др.]. – Минск, 2014. – С. 56–58.

16. Орукари, Б. Наладка двухсуппортного станка с ЧПУ при совмещенной работе суппортов / Б. Орукари // Технология – Оборудование – Инструмент – Качество: тез. докл. 31-ой междунар. науч.-практич. конф., Минск, 8–9 апреля 2015 г. / редкол.: В.К. Шелег [и др.]. – Минск, 2015. – С. 130–132.

17. Каштальян, И.А. Изготовление нежестких деталей на двухсуппортных то-

карных станках с ЧПУ / И.А. Каштальян, Б. Орукари // Технология – Оборудование – Инструмент – Качество: тез. докл. междунар. науч.-практич. конф., Минск, 7–8 апреля 2016 г. / редкол.: В.К. Шелег [и др.]. – Минск, 2016. – С. 84–85.

18. Каштальян, И.А. Автоматизированный выбор рациональных вариантов совмещения переходов на двухсуппортных токарных станках с ЧПУ / И.А. Каштальян, Б. Орукари, Д.Е. Артанович // Технология – Оборудование – Инструмент – Качество: тез. докл. междунар. науч.-практич. конф., Минск, 7–8 апреля 2016 г. / редкол.: В.К. Шелег [и др.]. – Минск, 2016. – С. 86–88.

19. Каштальян, И.А. Структурная модель технологического потенциала двухсуппортного токарного станка с ЧПУ / И.А. Каштальян, Б. Орукари, А.В. Шпак // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки: тез. докл. междунар. науч.-практич. конф., Минск, 5 апреля 2017 г. / редкол.: В.К. Шелег [и др.]. – Минск, 2017. – С. 125–127.

20. Каштальян, И.А. Управление процессом резания с делением подачи на двухсуппортных токарных станках с ЧПУ // И.А. Каштальян, Б. Орукари, В.И. Романенко // Перспективные направления развития технологии машиностроения и металлообработки: тез. докл. междунар. науч.-практич. конф., Минск, 5 апреля 2017 г. / редкол.: В.К. Шелег [и др.]. – Минск, 2017. – С. 127–129.

21. Орукари, Б. Оптимизация режимов резания при обработке заготовок на двухсуппортных токарных станках с ЧПУ / Б. Орукари, И.А. Каштальян, В.И. Романенко // Технология – Оборудование – Инструмент – Качество: тез. докл. междунар. науч.-практич. конф., Минск, 11 апреля 2018 г. / редкол.: В.К. Шелег [и др.]. – Минск, 2018. – С. 121–123.

РЭЗІЮМЭ

Арукары Бакума Дж.

Тэхналагічнае забеспячэнне аўтаматызаванага праектавання аперацыі механічнай апрацоўкі на двухсупартных такарных станках з ЛПК

Ключавыя словы: лікавае праграмнае кіраванне, тэхналагічны пераход, макраазначэнне, цыкл, матэматычная мадэль, структурная мадэль, алгарытм, праграмны модуль, нестакцыянарны працэс, якасць, дакладнасць, дыягностыка, аптымізацыя.

Мэта працы: распрацоўка тэхналагічнага забеспячэння аўтаматызаванага праектавання аперацыі механічнай апрацоўкі на двухсупартных такарных станках з ЛПК, якое забяспечвае павышэнне прадукцыйнасці і зніжэнне сабекошту вырабу дэталей пры зададзеных параметрах якасці і стойкасці рэжучага інструменту.

Метады даследавання: фундаментальныя палажэнні тэорыі рэзання і тэхналогія машынабудавання; матэматычны апарат тэорыі прыняцця рашэнняў, мадэлявання і аптымізацыі; метады тэорыі аўтаматычнага кіравання, лікавага аналізу і матэматычнай статыстыкі, планавання эксперыменту; пакеты праграм: Microsoft Visual studio, AutoCAD, SolidWorks, Pro / Engineer, Microsoft office.

Атрыманя вынікі і іх навізна: апісаны мадэлі і алгарытмы сінтэзу структуры тэхналагічнай аперацыі, што ажыццяўляецца на двухсупартных такарных станках, аснашчаных прыладай ЛПК з функцыяй незалежнага кіравання каардынатнымі перамяшчэннямі; прадстаўлены вынікі эксперыментальных даследаванняў якасці апрацоўкі і стойкасці рэжучага інструменту пры розных варыянтах сумяшчэння тэхналагічных пераходаў; разгледжаны колькасна-аналітычны метад прагназавання дакладнасці апрацоўкі пры розных варыянтах сумяшчэння тэхналагічных пераходаў, макраазначэнняў і цыклаў; прыведзена матэматычная мадэль аптымізацыі рэжымаў рэзання пры розных варыянтах сумяшчэння рабочых ходоў.

Рэкамендацыі па выкарыстанні: сістэма аўтаматызаванага праектавання аперацыі механічнай апрацоўкі на двухсупартных такарных станках, аснашчаных прыладай ЛПК з функцыяй незалежнага кіравання каардынатнымі перамяшчэннямі, укаранёна на ААТ «Мінскі завод аўтаматычных ліній ім. П.М. Машэрава» пры вырабе дэталей «Фланец» на станку мад. 1А734Ф3; вынікі даследаванняў знайшлі прымяненне таксама ў навучальным працэсе БНТУ пры падрыхтоўцы студэнтаў, магістрантаў і аспірантаў па спецыяльнасцях «Тэхналогія машынабудавання» і «Аўтаматызацыя тэхналагічных працэсаў і вытворчасцяў».

Сфера выкарыстоўвання: апрацоўка нарыхтовак дэталей машын на двухсупартных такарных і такарна-карусельных станках з ЛПК.

РЕЗЮМЕ

Орукари Бокумо Дж.

Технологическое обеспечение автоматизированного проектирования операции механической обработки на двухсуппортных токарных станках с ЧПУ

Ключевые слова: числовое программное управление, технологический переход, макроопределение, цикл, математическая модель, структурная модель, алгоритм, программный модуль, нестационарный процесс, качество, точность, диагностика, оптимизация.

Цель работы: разработка технологического обеспечения автоматизированного проектирования операции механической обработки на двухсуппортных токарных станках с ЧПУ, обеспечивающего повышение производительности и снижение себестоимости изготовления деталей при заданных параметрах качества и стойкости режущего инструмента.

Методы исследования: фундаментальные положения теории резания и технологии машиностроения; математический аппарат теории принятия решений, моделирования и оптимизации; методы теории автоматического управления, численного анализа и математической статистики, планирования эксперимента; пакеты программ: Microsoft Visual studio, AutoCAD, SolidWorks, Pro/Engineer, Microsoft office.

Полученные результаты и их новизна: описаны модели и алгоритмы синтеза структуры технологической операции, выполняемой на двухсуппортных токарных станках, оснащенных устройством ЧПУ с функцией независимого управления координатными перемещениями; представлены результаты экспериментальных исследований качества обработки и стойкости режущего инструмента при различных вариантах совмещения технологических переходов; рассмотрен численно-аналитический метод прогнозирования точности обработки при различных вариантах совмещения технологических переходов, макроопределений и циклов; приведена математическая модель оптимизации режимов резания при различных вариантах совмещения рабочих ходов.

Рекомендации по использованию: система автоматизированного проектирования операции механической обработки на двухсуппортных токарных станках, оснащенных устройством ЧПУ с функцией независимого управления координатными перемещениями, внедрена на ОАО «Минский завод автоматических линий им. П.М. Машерова» при изготовлении деталей «Фланец» на станке мод. 1А734ФЗ; результаты исследований нашли применение также в учебном процессе БНТУ при подготовке студентов, магистрантов и аспирантов по специальностям «Технология машиностроения» и «Автоматизация технологических процессов и производств».

Область применения: обработка заготовок деталей машин на двухсуппортных токарных и токарно-карусельных станках с ЧПУ.

SUMMARY

Orukari, Bokumo Jr.

Technological support of computer-aided design of mechanical process on four-axis CNC lathes

Key words: numerical control, technological transition, macro-definition, cycle, mathematical model, structural model, algorithm, software module, non-stationary process, quality, accuracy, diagnostics, optimization.

Goal of the research: development of technological support of computer-aided design of mechanical process on four-axis CNC lathes, providing enhanced productivity and reduced cost of machining of parts with specified parameters of quality and cutting tool resistance.

Methods of the research: the fundamental principles of cutting theory and mechanical engineering technology; mathematical apparatus of the theory of decision-making, modeling and optimization; methods of theory of automatic control, numerical analysis and mathematical statistics, experiment planning; software packages include Microsoft Visual studio, AutoCAD, SolidWorks, Pro/Engineer, Microsoft office packet.

Obtained results and their novelty: models and algorithms for the synthesis of structure of technological operation performed on four-axis lathes, equipped with a CNC device with the function of independent control of coordinate movements are described; results of experimental research of the machining quality and cutting tool resistance for different variants of combination of technological transitions are presented; a numerical and analytical method for predicting the accuracy of machining for different variants of combination of technological transitions, macro-definitions and cycles is considered; mathematical model of optimization of cutting conditions for different variants of combination of work stroke is given.

Recommendations for application: the system of computer-aided design of machining operations on four-axis lathes, equipped with a CNC device with the function of independent control of coordinate movements, is applied at the JSC “Minsk Automated Lines Plant, named after P.M. Masherova” in the manufacture of ‘Flange’ parts on the lathe of model 1A734Φ3; research results have found application also in the educational process of the Belarusian National Technical University in the training of undergraduate students, post-graduate masters students and doctorate researchers in the specialties “Technology of Mechanical engineering” and “Automation of technological processes and production”.

Field of application: machining of component parts workpiece on four-axis turning and rotary-turning CNC lathes.