


Т: 82  
Государственный комитет Российской Федерации  
по высшему образованию  
Челябинский государственный технический университет

На правах рукописи



ТАТАРКИН Евгений Юрьевич

ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ И ТОЧНОСТИ ОБРАБОТКИ  
ДЕТАЛЕЙ ПУТЕМ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ  
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ МЕТОДАМИ ПОИСКОВОГО КОНСТРУИРОВАНИЯ

Специальность 05.02.08 - "Технология машиностроения"

АВТОРЕФЕРАТ  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Челябинск  
1995

Работа выполнена в Алтайском государственном  
техническом университете им. И.И. Ползунова

Официальные оппоненты: доктор технических наук,  
профессор Митрофанов В.Г. ;  
доктор технических наук,  
профессор Султан-Заде Н.М. ;  
доктор технических наук,  
профессор Игнатъев Г.С.

Ведущее предприятие - АО "АНИТИМ" г. Барнаул.

Защита состоится " 25 " апреля 1995 года, в 16 часов,  
в ауд. 502 на заседании диссертационного Совета Д 053.13.05  
в Челябинском государственном техническом университете  
по адресу: 454080, Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЧГТУ.

Автореферат разослан " \_\_\_\_ " " \_\_\_\_ " 1995г.

Ученый секретарь диссертационного совета  
доктор экономических наук, профессор

 И.И. Баев

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

## А к т у а л ь н о с т ь   п р о б л е м ы

Развитие технических систем различных классов характеризуется такими устойчивыми тенденциями, как снижение их материалоемкости, расширение номенклатуры, сокращение сроков разработки и внедрения, постоянно возрастающими требованиями к производительности и качеству. Важнейшим фактором, определяющим качество механизмов и машин, является точность изготовления деталей. Достижение точности размеров в настоящее время вследствие использования приборов активного контроля не представляет существенных трудностей. Более актуальным является стабильное обеспечение отклонений формы, взаимного расположения и волнистости поверхностей. Их величина, например, для цилиндрических деталей, на которые приходится до 50% от общей номенклатуры, может составлять 16-60% от общего допуска. К таким погрешностям относятся: эксцентриситет и радиальное биение, отклонение от круглости и цилиндричности, волнистость. В технологических процессах изготовления корпусных деталей требования к качеству их обработки также возрастают. За истекшие 20 лет допуск на отклонения от плоскостности уменьшился более чем в 8 раз.

Возникают проблемы \* при снижении массогабаритных характеристик и увеличении долговечности машин. Уменьшение массы деталей, как правило, сопровождается уменьшением их жесткости и ухудшением их демпфирующих свойств. Это приводит к возрастанию упругих откатов и вибрации. Для достижения требуемой точности в таких случаях занимают режимы резания, увеличивают количество операций ТП, что, безусловно, приводит к снижению технико-экономических показателей.

При внедрении деталей с износостойкими покрытиями для повышения долговечности сложным остается обеспечение такого точностного параметра, как колебание толщины остаточного слоя покрытия при механической обработке. Это связано с практическим отсутствием зависимостей для расчета сил резания, способов управления этим параметром, несовершенством методик проектирования ТП.

Несмотря на крупные достижения в области теории точности, имеющемуся большому объеме математических моделей и известных решений по управлению точностью обработки, широко распространенным остается экстенсивный путь. Экспертный опрос специалистов, выполненный в рамках данного исследования, показал, что около 60% респондентов предполагают решение проблемы обеспечения возрастающих требований к точностным параметрам за счет повышения жесткости оборудования и снижения режимов резания. По существующим прогнозам при таком подходе сокращение допуска в 2 раза потребует увеличения затрат в 8 раз. Это, безусловно, отрицательно повлияет на экономические показатели и конкурентоспособность продукции машиностроительных производств.

Сокращение такого разрыва между точностью и требуемыми затратами возможно за счет разработки и внедрения высокоэффективных способов управления на базе новых методик их поиска. Существующие методики используют, как правило, только базы данных прошлого опыта, не учитывают законы и закономерности развития технических систем данного класса. Широко распространенным остается при поиске новшеств метод "проб и ошибок". В результате ежегодно число патентоспособных решений сокращается на 30-40%.

Наибольший удельный вес в ТП занимают операции точения, фрезерования и шлифования (до 60% от общей стоимости оборудования). Следовательно, перечисленные выше погрешности и методы обработки должны быть первоочередной зоной анализа. Совершенствование существующих и поиск новых решений по обеспечению точностных параметров позволит повысить производительность и получить наибольший экономический эффект.

#### Ц е л ь   р а б о т ы

Повышение производительности обеспечения точностных параметров деталей путем совершенствования и разработки эффективных способов управления и инструментов на основе методологии поискового конструирования.

#### З а д а ч и   и с с л е д о в а н и я

I. Разработать методику проектирования перспективных и

патентоспособных технических решений по управлению точностными параметрами деталей и создать автоматизированный комплекс для ее реализации.

2. Теоретически обосновать, провести математическое моделирование и экспериментально подтвердить эффективность разработанных способов управления для операций точения, фрезерования и шлифования.

3. Исследовать механизм формообразования и разработать методику проектирования ТП и способов управления точностью для деталей с износостойкими покрытиями.

4. Внедрить новые инструменты, способы управления, контроля и усовершенствованные технологические процессы в производство.

#### Научная новизна

Предложена методика автоматизированного проектирования инструментов, способов управления и контроля точностных параметров деталей, базирующаяся на основных положениях методологий поискового конструирования и функционально-стоимостного анализа. При проектировании учитываются законы и закономерности развития систем рассматриваемого класса, их свойства, прогнозная информация. Математические модели, описывающие процессы образования поверхностей, позволяют рассчитывать основные точностные параметры деталей и проводить имитационное моделирование. Выполнено теоретическое обоснование разработанных инструментов и способов управления отклонениями от цилиндричности при точении (А.с. N 1745412, N 1780931, N 1768947, патент RU 2004990С1); отклонениями от плоскостности и волнистостью при торцовом фрезеровании (патент RU N 2005006 С1 и положительное решение на выдачу А.с. по заявке N 5038139/08); отклонениями от concentричности, круглости и волнистостью при шлифовании (А.с. N 770754, N 1227426), колебанием толщины остаточного слоя у деталей с износостойкими покрытиями

(патент RU N 2004991 С1). В процессе теоретического обоснования способов управления были аналитически определены условия снижения волнистости при фрезеровании плоских поверхностей. Изучены закономерности и получены зависимости для расчета волнистости на шлифовальных кругах, найдены условия обработки, при которых снижается влияние на точность неравномерности износа инструмента. Получены зависимости для расчета сил резания при обработке отдельных видов покрытий.

#### М е т о д ы   и с с л е д о в а н и я

Теоретические исследования проводились на базе научных основ технологии машиностроения, теории точности, теории резания, теории колебаний, теории шлифования. При разработке общей методики поиска решений использовались основные положения системного анализа и синтеза, методология поискового конструирования и функционально-стоимостного анализа, методы инженерного творчества. Математическое моделирование выполнялось с применением теории вероятностей и математической статистики, использовались численно-аналитические методы, а также методы дифференциального и интегрального исчисления.

Экспериментальные исследования проводились как по стандартным методикам с использованием для обработки данных теории планирования экспериментов, так и на специальных установках и модернизированном оборудовании. Часть методик являются оригинальными и защищены охранными документами НИИГПЭ (А.с. N 918796, N 921821, N 992174).

#### П р а к т и ч е с к а я   ц е н н о с т ь   р а б о т ы.

Методическое, информационное и программное обеспечение для реализации методики поиска эффективных и патентоспособных способов управления точностью: проблемно-ориентированные по методам обработки и видам погрешностей морфологические таблицы; специализированный фонд эвристических приемов; комплекс методов, направленных на интенсификацию творческого труда проектировщиков, реализованный на ЭВМ в виде автоматизированной системы; методики и программные модули для расчета точностных параметров деталей.

Разработаны способы управления и инструменты, повышающие эффективность процесса обеспечения точности обработки. Защищены охраняемыми документами НИИГТЭ: способ управления и способ контроля отклонений от цилиндричности, самоподнастраивающиеся резцы и резцы с корпусами из полимербетонa; способы управления отклонениями от плоскостности и волнистостью при фрезеровании; способы управления величиной остаточного эксцентриситета и волнистостью деталей при шлифовании. Разработана методика совершенствования технологических процессов и способы управления колебанием толщины остаточного слоя для деталей с износостойкими покрытиями, а также способ определения его прочности.

Реализация результатов работы  
 Результаты работы реализованы при внедрении:

- автоматизированной системы проектирования способов управления точностью обработки, оснастки и инструментов (Республиканский центр новых информационных технологий, г.Москва);
- программных модулей для расчета точностных параметров деталей на операциях точения, фрезерования и шлифования (отраслевая лаборатория САПР, Мосстанкин; з-д топливных насосов ПО АМЗ, г. Барнаул);
- автоматизированного стенда сбора и обработки данных о процессах механической обработки (з-д топливных насосов ПО АМЗ, г.Барнаул);
- прибора для контроля точностных параметров деталей;
- в технологических процессах изготовления: деталей класса "нежесткие валы" (Рубцовский машиностроительный завод)\* корпуса (ПО "Луч", г.Барнаул); на операциях шлифования (Барнаульский станкостроительный завод); ответственных деталей двигателей внутреннего сгорания ("Барнаултрансмаш"); деталей с износостойкими покрытиями (ПО "Ростсельмаш" г.Ростов-на-Дону, Барнаульский станкостроительный завод);
- в учебном процессе Алтайского государственного технического университета им.И.И.Ползунова.

## А п р о б а ц и я   р а б о т ы

Результаты работы докладывались и обсуждались на: **Международной научно-технической конференции "Проблемы автоматизации и технологии в машиностроении"** (Рубцовск, 1994г.), **Международном симпозиуме "Наукоемкие технологии и проблемы их внедрения на машиностроительных и металлургических предприятиях Дальнего Востока"** (Комсомольск-на-Амуре, 1994); **Всесоюзных конференциях: "Прогрессивные методы абразивной, алмазной и альборной обработки в машиностроении"** (Полтава, 1979 г.); **"Научные основы автоматизации производственных процессов, управления качеством в машиностроении и приборостроении"** (Москва, 1979 г.); **"Прогрессивные методы повышения качества, долговечности и надежности машин при алмазно-абразивной обработке"** (Волжский, 1981г.); **"Измерение и контроль при автоматизации производственных процессов"** (Барнаул, 1982 г.); **"Технологическое управление триботехническими характеристиками узлов машин"** (Севастополь, 1983г.); **"Теория и практика газотермического нанесения покрытий"** (Москва, 1985 г.); **Разработка и промышленная реализация новых механических и физико-химических методов обработки** (Москва, 1988 г.). **На республиканских конференциях: "Повышение эффективности обработки конструкционных материалов"** (Улан-Удэ, 1985 г.); **"Автоматизация производственных процессов"** (Душанбе, 1985 г.); **"Разработка и внедрение гибких автоматизированных систем в производство"** (Севастополь, 1985г.); **"САПР ТП в машиностроении"** (Одесса, 1985 г.); **"Теория и практика газотермического нанесения покрытий"** (Севастополь, 1988г.); **"Повышение эффективности производства машиностроительных предприятий"** (Душанбе, 1990г.); **"Выбор конструкций и режимов резания при эксплуатации прогрессивного твердосплавного инструмента"** (Екатеринбург, 1990г.), а также на региональных научно-технических конференциях: Барнаул (1979-1993г.г.), Нижний Новгород (1984г.), Кемерово (1988), Новосибирск (1982), Рубцовск (1987,1989), Ярославль (1981).

## П у б л и к а ц и и

По теме диссертации опубликовано 69 печатных работ, в том



числе 2 монографии и брошюра (в соавторстве), получено 3 патента, 10 авторских свидетельств и 1 положительное решение.

### Ст р у к т у р а и о б ъ е м р а б о т ы

Диссертация состоит из введения, семи глав, общих выводов, списка литературы из 241 наименования и приложений. Работа изложена на 369 страницах машинописного текста, содержит 94 рисунка, 19 таблиц.

## СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

Прогнозы специалистов ведущих в области машино- и приборостроения стран показывают, что материалоемкость машин и их стоимость будут стабильно уменьшаться, а надежность и долговечность - возрастать. Увеличится время морального старения. К концу тысячелетия оно должно достигнуть 20-30 лет. Число классов технических систем удваивается каждые 10 лет, а их сложность по количеству деталей - каждые 15 лет. В отечественном машиностроении наблюдаются обратные тенденции.

Имеющийся разрыв между современными требованиями и существующим положением может быть в значительной степени сокращен за счет повышения точностных параметров и долговечности деталей, снижения их массогабаритных характеристик, внедрения мало- и безотходных технологических процессов (использование износостойких покрытий, методов порошковой металлургии и т.п.).

Точность изготовления является одним из основных параметров. Достижение точности размера в настоящий момент не представляет существенных трудностей. Более сложным является стабильное обеспечение все возрастающих требований к отклонениям формы, взаимного расположения, волнистости.

Наибольший удельный вес в ТП, обеспечивающих вышеперечисленные параметры, составляют операции точения (29,2% от общей стоимости оборудования), шлифования (15,8%) и фрезерования (13,2%). Эти погрешности и методы обработки должны быть первоочередной зоной анализа, совершенствования и поиска новых

решений, что даст наибольший экономический эффект.

Наиболее глубоко изучены закономерности образования отклонений формы и взаимного расположения для цилиндрических поверхностей, обрабатываемых точением. Требуют дальнейших исследований вопросы формирования точностных параметров деталей на операциях фрезерования плоских сложноконтурных поверхностей. Существующие способы не позволяют при шлифовании эффективно управлять процессом исправления таких погрешностей заготовок как отклонение от соосности (эксцентриситет) и радиальное биение. Стабильность обеспечения требуемых отклонений от круглости и волнистости может быть достигнута за счет способов управления, позволяющих снизить отрицательное влияние неравномерности износа инструмента на точность. Практически неизученным остается вопрос управления точностными параметрами деталей с износостойкими покрытиями: операции проектируются как для процессов обработки однородных материалов, не учитывается влияние технологического наследования на всех этапах изготовления, основное внимание, как правило, уделяется достижению требований шероховатости поверхностей, не нормируется такой важнейший показатель, как колебание толщины остаточного слоя покрытия.

Одной из причин такого положения является достаточно низкая эффективность методик поиска. Существующие методики проектирования способов управления точностью и инструментов базируются, как правило, только на прошлом опыте, не учитывают законы и закономерности развития технических систем данного класса, не используется прогнозная информация и методы инженерного творчества. Широко распространенным при поиске новых решений остается метод "проб и ошибок". Следствием этого является увеличивающийся разрыв между требованиями к точности изготовления деталей, производительностью и технологическим обеспечением.

Достижения в области теории точности, теории поискового конструирования, методологии функционально-стоимостного и сис-

темного анализа создали предпосылки для разработки эффективных и перспективных путей управления точностью обработки.

### РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ ТОЧНОСТНЫМИ ПАРАМЕТРАМИ ДЕТАЛЕЙ

Процесс образования поверхностей при механической обработке и формирования точностных параметров деталей необходимо изучать с позиций системного подхода. Система "Формирование точностных параметров деталей" может быть разбита на подсистемы "Внешняя среда", "Процесс", "Упругая система станка", "Приводы станка", "Инструмент", "Заготовка", "Смазочно-охлаждающая жидкость" (СОЖ), "Формирование выхода". Входами подсистемы "Внешняя среда" являются точность размеров, отклонения формы, взаимного расположения и волнистость отдельных поверхностей обработанных деталей. Выходы подсистемы "Внешняя среда" характеризуют "исходное состояние" всех подсистем.

Методы обработки, сходные по схемам образования поверхностей, целесообразно рассматривать с одних позиций. При таком подходе результирующую погрешность изготовления детали  $\Delta_{\Sigma}$  можно выразить для технологического процесса из  $n$  операций в виде суммы векторов:

$$\vec{\Delta}_{\Sigma} = \sum_{i=1}^n (\vec{\Delta}_{ин} + \vec{\Delta}_{пр} + \vec{\Delta}_{к} + \vec{\Delta}_{во} + \vec{\Delta}_{вн} + \vec{\Delta}_{кон})_i, \quad (I)$$

где  $\vec{\Delta}_{ин}$  - погрешность, вносимая промежуточным носителем информации;  $\vec{\Delta}_{пр}$  - погрешности, возникающие при преобразовании информации с промежуточного носителя в естественную форму;  $\vec{\Delta}_{к}$  - кинематические погрешности способа обработки;  $\vec{\Delta}_{во}$ ,  $\vec{\Delta}_{вн}$  - соответственно обратимые и необратимые погрешности, возникающие от действия энергетических потоков;  $\vec{\Delta}_{кон}$  - погрешности контроля.

Отдельные подсистемы, определяющие результирующую погрешность и обеспечивающие точность обработки, могут быть представлены описаниями в виде графа и имеющими иерархическую

сподчиненность. К числу таких описаний, в соответствии с теорией поискового конструирования, относятся: функция (в данном случае точностной параметр или погрешность); техническая функция; функциональная структура; физический принцип действия; техническое решение; проект.

Функция технической системы  $\Delta_1$  описывается тремя компонентами:

$$\Delta_1 = (D_1, G_1, H_1), \quad (2)$$

где  $D_1$  - действие, которое производит техническая система (станок, режущий инструмент и т.д.), приводящее к обеспечению погрешности  $\Delta_1$  в заданных пределах;  $G_1$  - объект, на который направлено действие;  $H_1$  - ограничение на выполняемое действие.

Техническая функция  $F_1$  имеет следующее описание:

$$F_1 = (\Lambda_1, Q_1), \quad (3)$$

где  $Q_1$  - физическая операция. Она формализованно представляется тремя компонентами.

$$Q_1 = (A_1 \rightarrow E_1 \rightarrow C_1), \quad (4)$$

где  $A_1$  и  $C_1$  - соответственно входные и выходные потоки вещества, энергии и информации в процессе обработки,  $E_1$  - операция преобразования.

Одна и та же погрешность обработки может быть устранена с помощью различных операций преобразования и физико-технических эффектов (ФТЭ). В настоящее время известно более 3000 ФТЭ. Такое их количество позволяет синтезировать практически необозримое количество физических принципов действия (ФПД), технических решений и их реализаций (проектов). Чем выше уровень решаемой задачи в приведенной иерархии описания, тем выше технико-экономические результаты.

Предлагаемая методика проектирования технических систем для управления точностью обработки включает в себя ряд последовательных этапов: анализ исходного ТЗ, анализ зон сосредоточения наибольших затрат и брака (с использованием методологии функционально-стоимостного анализа), уточнение технологических целей, морфологический анализ и синтез решений, выбор рациональных

вариантов на основе математического моделирования и экспериментальной проверки.

При анализе ТЗ необходимо ориентироваться на "идеальное" решение, выявленные списки недостатков совершенствуемого прототипа и списки требований к техническим системам, обеспечивающим управление точностью обработки.

Для того чтобы выявить область поиска решений и установить ее рациональные границы, укрупненно выбирается зона анализа путем распределения отдельных операций или поверхностей деталей (и соответственно параметров точности) по затратам, трудоемкости и качеству исполнения. В качестве инструмента исследования используется метод ранжирования по величине затрат. Метод исходит из того, что, если допустить примерно одинаковый уровень решений по обеспечению параметров точности в исходном ТП, то с большой вероятностью можно ожидать значительное снижение затрат по тем точностным параметрам, у которых фактические затраты велики. С этой целью рассчитанные значения себестоимости располагаются в порядке убывания. Затем строится график путем постепенного ступенчатого наращивания поэлементных затрат, начиная с самых высоких их значений и кончая минимумом расходов, приходящихся на операцию (параметр точности). После этого затраты распределяются по зонам с помощью метода "ABC", в соответствии с которым первая зона "А" отвечает наибольшему сосредоточению затрат (до уровня 75%), вторая зона "В" составляет 20% общих затрат и дополняет первую до уровня 95%, на третью зону "С" приходится соответственно 5%, и она дополняет зоны "А" и "В" до 100%, завершая общий баланс распределения затрат на обеспечение точностных параметров деталей. Такой вид представления затрат в практике функционально-стоимостного анализа получил название кривой Лоренца-Парето.

После уточнения технологических целей составляются морфологические таблицы. Возможны различные подходы при их построении с учетом приведенной выше иерархией описания. Они могут строиться на базе конструктивно-функциональных структур

(КФС) конкретного прототипа. Строками морфологических таблиц являются признаки (функции или элементы структуры), а столбцами — варианты их реализации. Возможно построение таблиц не только на базе конкретного прототипа, но и на основе обобщения нескольких функциональных структур одного класса. Таблицы составляются либо для определенных точностных параметров деталей (например, отклонений от цилиндричности, эксцентриситета, волнистости и т.п.), либо для составляющих суммарной погрешности обработки (упругих и температурных деформаций, вибрации и т.д.).

Наибольший эффект дает использование таблиц, ориентированных на метод обработки (точение, фрезерование, шлифование и т.д.). Однако это не исключает возможность использования обобщенных таблиц (независимо от метода обработки), которые позволяют находить принципиально новые решения с их последующей адаптацией к определенному классу деталей.

Анализ функциональных структур технических систем, предназначенных для управления точностными параметрами и составляющими погрешности, их последующая систематизация и создание соответствующих банков данных, служит базой для дальнейших перспективных разработок.

Признаки в морфологические таблицы вводятся с учетом их разбиения на подсистемы: "Заготовка", "Инструмент", "Упругая система" и т.д., которые могут быть использованы как независимые. Следует выделить признак "Отрицательные явления", т.е. источники погрешностей, используемые для компенсации других погрешностей и управления точностью обработки (вибрации, упругие деформации, износ и т.п.). Выполненная декомпозиция системы формирования точностных параметров деталей дает возможность выбирать нужный "источник информации" и использовать его для управления. Ими могут быть мощность резания, сила, вибрация заготовки и ряд других. Последним признаком в морфологических таблицах являются "Используемая энергия и/или физико-технический эффект".

При заполнении морфологических таблиц (варианты реализации функций и структурных составляющих), помимо прототипов,

необходимо использовать: результаты патентного поиска для совершенствуемого метода обработки, варианты реализации аналогичных функций в технических системах более высокого класса. Обязательным условием при расширении морфологических таблиц является учет прогнозов, основных законов и закономерностей развития для совершенствуемого класса технических систем (инструментов, приспособлений, способов обработки и т.д.). Положительные результаты дает использование комбинаций взаимусиливающих вариантов, входящих в морфологическую таблицу и принадлежащих одному признаку.

В качестве инструментария для расширения вариантов, помимо вышеперечисленных источников, применяется сформированный специализированный фонд эвристических приемов и методы инженерного творчества. Они реализованы на ЭВМ в виде автоматизированной обучающей системы "Творчество". Система содержит методы гирлянд ассоциаций, контрольных вопросов, мозговой атаки, ликвидации тупиковых ситуаций, принудительных отношений и ряд других.

Имея морфологическую таблицу, составленную даже из известных решений, можно получить новые, более эффективные. Например, если рассмотреть 5 резцов, состоящих из 5-ти элементов различного конструктивного исполнения, то может быть получено 3125 решений. Даже при условии, что 99% из них не отвечают признакам патентной чистоты, то 31 решение будет условно новым.

При синтезе, являющимся одним из завершающих этапов, анализируются все решения, отвечающие целям проектирования и ТЗ. Для приемлемых решений проводится математическое моделирование и экспериментальная проверка.

При математическом моделировании необходимо выполнение следующего условия - структура математических моделей (ММ), независимо от метода обработки, должна соответствовать структуре анализируемой технической системы, предназначенной для управления точностью. В структуре ММ формообразования поверхностей целесообразно использовать каркасный подход и алгоритм, связанный с решением уравнения баланса перемещений в технологической сис-

теме. Это позволяет эффективно развивать существующий фонд ММ. Пакетная организация программ дает возможность оперативно "конструировать" ММ для оценки вариантов решений, полученных на этапе синтеза.

Завершающим является этап экспериментальной проверки. Разработанные методики экспериментальных исследований и универсальный автоматизированный стенд позволяют изучать процесс формирования точностных параметров для различных методов обработки с учетом многообразия влияющих технологических факторов (профилей заготовки и детали, сил резания, вибрации и др.), производить обработку данных, их хранение и выдачу для сравнения с результатами математического моделирования при оценке найденных решений.

#### УПРАВЛЕНИЕ ОТКЛОНЕНИЯМИ ОТ ЦИЛИНДРИЧНОСТИ ПРИ ОБРАБОТКЕ ВАЛОВ.

Характерной погрешностью, возникающей при изготовлении деталей класса "валы", является отклонение от цилиндричности. Наиболее ярко это проявляется у нежестких деталей: даже при незначительных силах резания упругие деформации могут быть по величине сопоставимы с допуском.

Для поиска новых и эффективных решений, направленных на обеспечение отклонений от цилиндричности в заданных пределах, был проведен анализ научно-технической и патентной литературы. В результате изучения более 500 известных решений (способы управления, устройства и инструменты) была составлена морфологическая таблица. Ее построение выполнялось по разработанной методике.

В качестве признаков в морфологической таблице использовались: "Инструмент" (положение режущей части относительно корпуса, корпус, пространственное положение РИ, количество РИ); "Упругая система" (приспособление, жесткость ТС); "Отрицательные явления", "Используемая информация",



"Используемая энергия и/или ФТЭ". Общее количество решений в таблице составило 46656. В предлагаемой работе ввиду ограниченности объема приведена лишь часть из них, которые защищены охранными документами ВНИИПЭ, проверены теоретически и экспериментально (конструкции резцов, способы изготовления нежестких валов, способы контроля отклонений формы). На рис. I приведены схемы самоподнастраивающихся резцов.

Токарный резец (рис. Ia) обеспечивает стабилизацию упругих отжатий заготовки относительно инструмента за счет изменения главного  $\phi$  и вспомогательного  $\phi_1$  углов в плане. Ось поворота режущей пластины расположена в ее вершине. Использование такого режущего инструмента возможно как при традиционной обработке, так и при точении с выравненной жесткостью, т.е. когда жесткости переднего центра, заднего центра и жесткости в критическом сечении заготовки равны. Вращение режущей пластины обеспечивается упругим элементом, например, пружиной кручения.

Ее жесткость  $J_{III}$  выбирается таким образом, чтобы приращение силы резания  $\Delta R_y$  вызывало поворот на угол  $\Delta\phi$ , компенсирующий это изменение:

$$J_{III} = \Delta R_{y_{max}} / \Delta\phi_{max} \quad (5)$$

Величина приращения силы резания зависит от колебания глубины резания и рассчитывается по традиционным зависимостям. Максимальное приращение главного угла в плане  $\Delta\phi_{max}$  ограничивается минимально допустимым углом в плане  $\phi_{1min}$  и находится по формуле:

$$\Delta\phi_{max} = 180^\circ - (\phi_0 + \phi_{1min}) - \varepsilon, \quad (6)$$

где  $\phi_0$  - начальный угол в плане,  $\varepsilon$  - угол при вершине.

В результате исследований, установлено, что при точении с изменением геометрии по сравнению с традиционной обработкой отклонения от цилиндричности снижены с 30 мкм до 8 мкм, т.е. почти в 3,5 раза. Конструкции резца защищена А.С. N 1780931.

Техническое решение по схеме, приведенной на рис. Ib, обеспечивает снижение отклонений от цилиндричности нежестких валов за счет постоянного изменения положения вершины резца.

Предложенная конструкция содержит режущую часть 1, державку 2, которые соединены между собой плоскопараллельной пружиной 3. В полости державки 2 расположены упругодеформируемый и демпфирующий узлы. Упругодеформируемый узел состоит из постоянного силового магнита 4 и ярма 5, закрепленного с возможностью осевой регулировки на штоке 6. Демпфирующий узел выполнен в виде постоянного силового магнита 7, жестко закрепленного на штоке 6.

При настройке инструмента устанавливается зазор между ярмом 5 и силовым магнитом 4, которые, взаимодействуя между собой посредством магнитного поля, создают усилие, противоположное радиальной составляющей силы резания. Положение ярма фиксируется гайкой 16. Связь между параметрами магнитной цепи и условиями обработки описывается формулой:

$$P_y = \frac{B_0^2 S_M L_M^2}{S_{II} \mu_0 (2L_3 S_M / S_{II} \theta_0 + L_M)^2} \quad (7)$$

где  $P_y$  — радиальная составляющая силы резания;  $B_0$  — магнитная индукция;  $S_M$  — площадь поперечного сечения магнита;  $L_M$  — длина магнита;  $\mu_0$  — магнитная постоянная;  $L_3$  — длина рабочего зазора;  $\theta_0$  — магнитная жесткость. Величина рабочего зазора  $L_3$  рассчитывается, исходя из условия  $P_y = P_{y \text{ max}}$ .

Так как силовая магнитная цепь настроена на максимальное значение силы резания, то происходит движение режущей части 1 в сторону обрабатываемой поверхности до установления баланса сил. Этим достигается стабилизация фактической глубины резания по всей длине детали, снижаются отклонения от цилиндричности. На данное решение выдано А.С. N 1745412.

В результате синтеза разработаны также конструкции и технология изготовления резцов с корпусами из полимерных материалов (полимерцемент и полимербетон).

Полученные в результате экспериментальных исследований физико-механические характеристики предложенных материалов при сопоставлении с силовыми параметрами процесса резания позволили сделать вывод о возможности применения режущих инструментов с

корпусными элементами из исследуемых составов на операциях чистовой и получистовой обработки (рис.2).

К числу преимуществ таких инструментов с корпусами из полимербетонов следует отнести высокие прочностные характеристики, достаточно хорошие технологические качества, повышенные по сравнению со сталью демпфирующие свойства. Экономический анализ показывает, что применение полимерных композиционных материалов позволяет существенно снизить металлоемкость, исключить операции механической обработки корпусов, сократить трудоемкость и энергоемкость изготовления и, как следствие, значительно (в 5-7 раз) снизить себестоимость.

Анализ показал, что наибольший удельный вес по затратам в ТП изготовления деталей класса "нежесткие валы" имеют операции точения и шлифования. Традиционно требуемая точность достигается уменьшением глубины шлифования и длительным выхаживанием. Однако снижение отклонений от цилиндричности может быть эффективно достигнуто за счет использования "отрицательных явлений" технологического наследования, то есть погрешность, обусловленную динамическим воздействием на выполняемой операции (шлифования), можно компенсировать "введением" погрешности на предшествующей операции точения. Таким образом седлообразность заготовки, полученная на операции точения, будет являться "барьером" для образования при шлифовании бочкообразности. Математическая зависимость, описывающая разработанный способ (патент RU N2004990 CI), запишется следующим образом:

$$r(x) = r_0 + t_{\text{зад}}^{\text{Ш}}(x) - \Delta_{\text{зад}}^{\text{Ш}}, \quad (8)$$

где  $r(x)$  - текущее значение радиус-вектора заготовки после точения;  $r_0$  - радиус готовой детали, заданный чертежом;  $t_{\text{зад}}^{\text{Ш}}(x)$  - текущее значение глубины резания при шлифовании;  $\Delta_{\text{зад}}^{\text{Ш}}$  - погрешность обработки при шлифовании.

Для проверки правильности предложенной технологии был проведен эксперимент. Шлифовали валики (отношение длины к диаметру  $l/d = 20$ ) из стали 20. В первой серии опытов использовали образцы, исходные отклонения от цилиндричности которых составляли  $\Delta_{\text{ц}} =$

2 мкм. После обработки при указанных режимах отклонения от цилиндричности были в пределах  $\Delta_{ц} = 40...45$  мкм. Во второй серии опытов шлифовали валики, имеющие отклонения от цилиндричности, профиль которых рассчитывали по разработанным зависимостям. Отклонения от цилиндричности после их обработки за один проход были равны 6...8 мкм, то есть уменьшены по сравнению с обычным способом в 5 раз. Реализация предложенной технологии на станках с ЧПУ не представляет трудностей и дает возможность снизить трудоемкость и себестоимость изготовления деталей без применения дополнительных устройств и приспособлений.

Разработка новых способов управления на операциях механической обработки должна сопровождаться соответственно повышением производительности и совершенствованием методов контроля отклонений формы.

Предложен способ (А.с. NI768947), заключающийся в том, что в процессе измерения деталь равномерно вращают (цилиндрические поверхности) или линейно перемещают (плоские поверхности). При этом щупу сообщают гармонические колебания с амплитудой, равной половине ширины исследуемого участка. Способ использовался при проведении экспериментальных исследований на автоматизированном экспериментальном стенде.

#### УПРАВЛЕНИЕ ПОКАЗАТЕЛЯМИ ТОЧНОСТИ ФОРМЫ И ВОЛНИСТОСТЬЮ ПЛОСКОСТЕЙ КОРПУСНЫХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ФРЕЗЕРОВАНИИ НА СТАНКАХ С ЧПУ

На многооперационных и фрезерных станках с ЧПУ 25...40% времени работы затрачивается на обработку плоскостей. Основными показателями точности при этом являются: точность размеров, отклонения от плоскостности и прямолинейности, средняя высота волнистости. Основная причина образования отклонений от плоскостности и волнистости связана с тем, что большая часть номенклатуры заготовок имеет сложную конфигурацию. При обработке таких заготовок постоянно изменяется ширина зоны фрезерования, становятся

переменными по длине заготовки упругие отжатия, возникают периодические колебания элементов ТС. Для поиска решений, обеспечивающих управление точностными параметрами и повышающих эффективность операций фрезерования на станках с ЧПУ, было проанализировано более 1000 описаний авторских свидетельств и патентов на изобретения, выданных на конструкции инструмента и способы управления показателями точности за последние 50 лет в шести странах (СССР, Великобритания, США, Германия, Франция, Япония). При ретроспективном анализе решений выявлялись приемы и способы, которые применялись (или могли применяться) при переходе от аналога и прототипа к изобретению. Это позволило сформировать специализированный фонд эвристических приемов совершенствования операций механической обработки. Результаты патентного поиска были систематизированы и сведены в морфологическую таблицу. Полученные на этапе автоматизированного синтеза ИБЗ решения включали как уже известные, так и новые способы управления и конструкции инструментов.

Для управления отклонениями от плоскостности деталей сложной конфигурации предложен способ торцового фрезерования на станках с ЧПУ (положительное решение о выдаче патента N 5038139/08), согласно которому относительное положение фрезы и заготовки изменяется в зависимости от текущей ширины последней таким образом, чтобы в контакте оставалось постоянное число режущих зубьев (рис.3). Это обеспечит стабилизацию силы резания и величины упругих отжатий, что приведет к снижению отклонений от плоскостности. В рассматриваемом случае (рис.3) необходимый угол контакта инструмента и фрезеруемой поверхности определится из выражения:

$$\varphi = 2 \cdot \arcsin(B_{\max} / (2 \cdot R)), \quad (8)$$

где  $B_{\max} = \max(y_1 - y_2)$  - максимальная ширина заготовки. Текущее значение положения центра фрезы  $y_{c1}$  (траектория движения) рассчитывается с учетом (8), исходя из контура заготовки  $y_1 = f_1(x)$  и  $y_2 = f_2(x)$ . Моделирование и экспериментальная проверка способа подтвердили его эффективность. На рис.4 приведены графики изме-

нения силы резания при фрезеровании заготовок трапецеидальной формы по традиционной технологии (кривая 1) и в соответствии с предложенным способом (кривая 2). Стабилизация угла контакта обеспечивает в 3.5 раза меньшую величину отклонений от плоскостности.

Эта же цель может быть достигнута без решения траекторной задачи и применения системы ЧПУ. Для этого функция управления передается режущим зубьям (кассетам) торцевой фрезы, которые имеют возможность поворачиваться относительно обрабатываемой поверхности и изменять тем самым соотношение между составляющими силы резания. Кассеты имеют конструкцию, аналогичную конструкции резца, приведенного на рис.1,а.

Применяя процедуры синтеза, из морфологической таблицы получены конструкции торцевых фрез, реализующие функцию управления вынужденными колебаниями. На способ, в составе которого используется одна из фрез, получен патент на изобретение (RU №2005006 С1). Особенностью данной конструкции является то, что ее режущие зубья имеют отличающиеся друг от друга значения главных углов в плане. Это позволяет изменять частоту вынужденных колебаний ТС и управлять процессом образования волнистости обработанной поверхности. При выборе параметров такой фрезы необходимо минимизировать амплитуду преобладающей гармоники  $A_{прев}$  в рассматриваемом спектре колебаний:

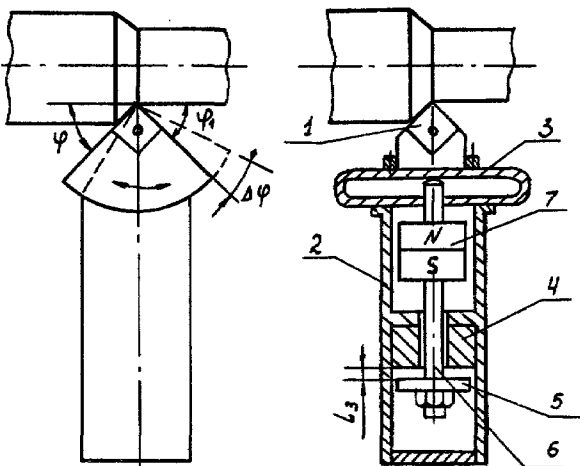
$$A_{прев} = \max_{k=1}^M [A(\omega)(a_k + b_k)^{0.5}] - \min, \quad (9)$$

где  $M$  - максимальный номер гармоники рассматриваемого спектра;  $a_k, b_k$  - коэффициенты разложения вынуждающей силы в ряд Фурье.

Однако в большинстве случаев частотные характеристики ТС станка, на котором будет проводиться обработка, неизвестны. В связи с этим возникает необходимость таким образом выбрать параметры способа (углы в плане  $\phi$  торцевой фрезы), чтобы они не зависели ни от основной частоты возмущающей силы, ни от частотных характеристик ТС. Для этого АЧХ ТС  $A(\omega)$  представляется в виде

Самоподнастраивающиеся резцы :

- а) с изменяющимися углами в плане ;  
б) управляемые магнитами



а)

б)

Рис. I

Схема определения траектории центра фрезы

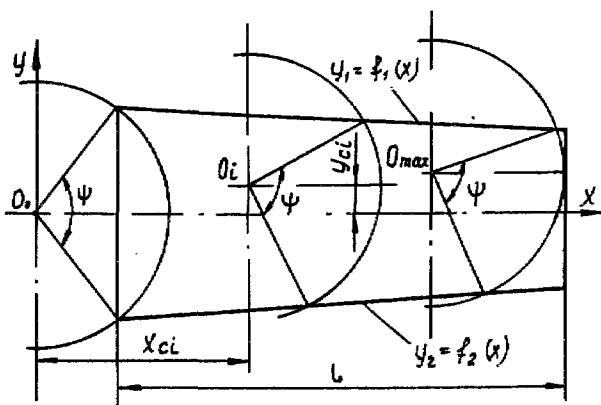


Рис.3

Области использования резцов с корпусами из полимерцемента (ПЦ) и полимербетона (ПБ)

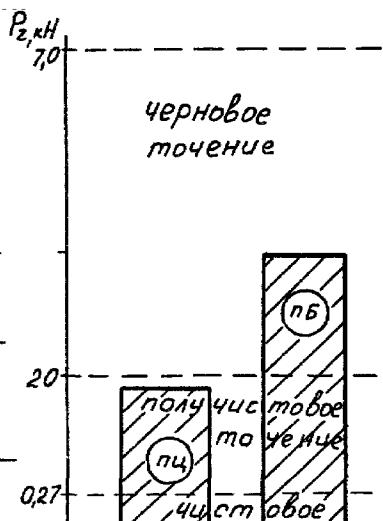


Рис.2

Изменение силы резания по длине заготовки

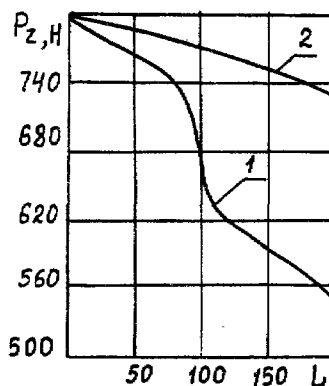


Рис.4

прямой линии. Расчет геометрических параметров фрезы заключается в максимальном приближении спектра возмущающей силы к ограниченному "белому шуму". В качестве целевой функции выбрана линейная свертка:

$$\sum_{i=1}^3 \alpha_i \left( \sum_{k=1}^M A_k^2 \right)_i \rightarrow \min, \quad (10)$$

где  $\left( \sum_{k=1}^M A_k^2 \right)_i$  - мощность гармоник спектра возмущающей силы в направлениях OX, OY, OZ;  $\alpha_i$  - весовые коэффициенты:  $\alpha_x = \alpha_y = 0.25$ ,  $\alpha_z = 0.5$ . Проверка показала, что выбор оптимальных для данной ТС конструктивно-геометрических параметров фрезы, используемой в способе управления показателями волнистости, позволяет на порядок снизить амплитуду превалирующей гармоники в рассматриваемом спектре колебаний ТС и уменьшить волнистость обработанной поверхности. Приведение спектра периодической возмущающей силы резания к ограниченному "белому шуму" за счет соответствующего выбора значений главных углов в плане режущих зубьев торцевой фрезы и порядка их установки в корпусе обеспечивает получение "универсальных" параметров инструмента, инвариантных к динамическим свойствам ТС.

#### ОБЕСПЕЧЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ ТОЧНОСТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ШЛИФОВАННЫХ ДЕТАЛЕЙ

На основании разработанной методики был найден ряд решений по управлению эксцентриситетом, отклонениями от круглости и волнистостью на шлифовальных станках. Для ускорения исправления эксцентриситета заготовки перед обработкой предложено создавать смещение оси ее наружной поверхности  $O$  (рис.5) относительно оси вращения  $O_B$  на величину  $\Delta \varepsilon_0$  (А.с. СССР N 770754). Обработка производится до момента достижения эксцентриситета  $\varepsilon_{\Sigma 0}$  значения, равного дополнительно созданному смещению  $\Delta \varepsilon_0$  (точка А, рис.5). Для исправления эксцентриситета  $\varepsilon_0$  при этом требуется меньшее число оборотов (проходов)  $K_2$  (кривая 2), чем при традиционной обработке  $K_2$  (кривая 1). Это происходит за счет увеличения съема металла со стороны большого радиус-вектора и уменьшения съема со



стороны меньшего радиус-вектора. Величина  $\Delta \varepsilon_0$  вычисляется следующим образом:

$$\Delta \varepsilon_0 = \frac{\varepsilon_0 (1-E)^m}{1 - (1-E)^m} \quad (11)$$

$$m = \frac{\Pi + 2\varepsilon_0 - t_0 + t}{t} \quad (12)$$

где  $E$  - коэффициент, зависящий от глубины резания  $t$  и жесткости системы;  $m$  - необходимое число проходов;  $\Pi$  - минимальный припуск на сторону;  $t_0$  - глубина резания на первом проходе  $t_0 = \frac{t}{E}$ . Если радиальное биение заготовки превышает  $t_0$ , то  $\Delta \varepsilon_0$  определяется численными методами. Использование способа ускоряет исправление эксцентриситета в отдельных случаях в 2...3 раза. Для практической реализации разработана конструкция специальной оправки и система адаптивного управления круглошлифовальным станком.

В результате теоретического анализа получены математические модели образования отклонений от круглости и волнистости, которые необходимы для проектирования и оценки способов управления этими погрешностями.

Формообразование рассматривается на основе анализа изменения текущих значений массивов радиус-векторов заготовки в результате последовательного съема металла  $\Delta r_1(\varphi, x)$  с ее поверхности.

Его величина рассчитывается с использованием вероятностного подхода, исходя из фактической глубины резания.

Значение  $t_{\Phi 1}(\varphi, x)$  определяется радиус-векторами заготовки  $r_{i-1D}(\varphi, x)$ , круга  $R_{1D}(\gamma, x)$  и межцентровым расстоянием  $A_{O1}$ :

$$t_{\Phi 1}(\varphi, x) = r_{i-1D}(\varphi, x) + R_{1D}(\gamma, x) - A_{O1} \quad (13)$$

Динамические радиус-векторы круга и заготовки вычисляются с учетом их температурных  $\delta r_{T_{i-1}}$ ,  $\delta R_{T_1}$  и упругих  $\delta r_{уп_{i-1}}$ ,  $\delta R_{уп_1}$  деформаций. Текущее значение радиус-вектора круга  $R_{1D}(\gamma, x)$  в момент времени  $t_1$  описывается функционалом:

$$R_{1D}(\gamma, x) = R_0(x) + \sum_{l=1}^P A_l(x) \cos(l\gamma + \psi_l(x)) - \int_0^{t_1} \bar{\varepsilon}_R(x, \tau) d\tau - \dots \\ \dots - \sum_{j=1}^P \int_0^{t_1} A_{\varepsilon j}(x, \tau) \cos(j\gamma + \psi_j(x, \tau)) d\tau + \delta R_{T_1} - \delta R_{уп_1}, \quad (14)$$

где  $R_o(x)$  - радиус средней окружности после правки;  $A_1(x)$  и  $\phi_1(x)$  - амплитуда и фаза 1-ой гармоники исходного профиля инструмента;  $\bar{S}_R(x, \tau)$  - средний износ в единицу времени. Четвертое слагаемое (I4) учитывает неравномерность износа и волнообразование на рабочей поверхности круга.

Межцентровое расстояние рассчитывается по зависимости:

$$A_{o1} = A_H - \int_0^t S_y(\tau) d\tau + \Delta A_{уп1} - (y_{k1} - y_{u1}), \quad (I5)$$

где  $A_H$  - межцентровое расстояние в начальный момент времени, определяемое как сумма максимальных радиус-векторов заготовки и круга;  $S_y(\tau)$  - поперечная подача;  $\Delta A_{уп1}$  - упругие деформации в технологической системе;  $y_{k1}$  и  $y_{u1}$  - координаты центров круга и изделия относительно их средних положений, определяемые вибрацией.

Фактическая глубина резания представлена суммой средней  $\bar{t}_{\Phi 1}(x)$  и колебательной  $t_{\Phi w1}(\varphi, x)$  составляющих ( $t_{\Phi 1}(\varphi, x) = \bar{t}_{\Phi 1}(x) + t_{\Phi w1}(\varphi, x)$ ):

$$\begin{aligned} \bar{t}_{\Phi 1}(x) = & r_{1-1}(x) + \delta r_{T1-1} - \delta r_{уп1-1} + R_o(x) + \delta R_{T1} - \delta R_{уп1} - \dots \\ & \dots - \int_0^t \bar{S}_R(x, \tau) d\tau + \int_0^t S_y(\tau) d\tau - \Delta A_{уп1} - A_H. \end{aligned} \quad (I6)$$

$$\begin{aligned} t_{\Phi w1}(\varphi, x) = & \sum_{k=1}^p A_{k1-1}(x) \cos(k_{1-1}\varphi + \phi_{k1-1}(x)) + \\ & + 1 \sum_{l=1}^p A_l(x) \cos(l\gamma + \phi_1(x)) - \dots \\ & \dots - \sum_{j=1}^p \int_0^t A_{sj}(x, \tau) \cos(j\gamma + \phi_j(x, \tau)) d\tau + (y_{k1} - y_{u1}). \end{aligned} \quad (I7)$$

Для определения координат центра круга  $O_K$  и заготовки  $O_U$  ( $y_{k1}$  и  $y_{u1}$  соответственно) станок рассмотрен как двухмассовая динамическая система, имеющая две степени свободы.

Расчет точности в соответствии с предложенной методикой необходимо выполнять в три этапа: 1) определение радиус-вектора заготовки с учетом погрешности ее установки; 2) последовательное вычисление по съему металла массивов радиус-векторов шлифуемой поверхности, начиная с первого оборота заготовки до момента снятия припуска; 3) расчет показателей точности по массиву радиус-векторов детали.

Разработанные методики исследований и экспериментальные

установки (А.с. N 918796, А.с. N 921821, А.с. N 992174) позволили изучать обработанную поверхность как в целом, так и ее отдельные участки, образованные за любой из оборотов круга с учетом профилей заготовки, инструмента и их взаимного положения.

Эксперименты подтвердили необходимость учета вероятностного характера явлений при определении съема материала и недостаточную точность при расчетах волнистости, исходя лишь из геометрических соотношений.

Установлено, что основными причинами некруглости и волнистости деталей является технологическая наследственность, вибрация и отклонения профиля рабочей поверхности круга. У инструмента значимы амплитуды первой и высокочастотных преобладающих гармоник, которые возрастают за период стойкости и являются причинами образования на детали соответственно огранки и волнистости. Волнистость на инструменте возрастает с большей скоростью при увеличении подачи и зернистости, а снижается при уменьшении его твердости. Режим преимущественного самозатачивания по критерию волнообразования более благоприятен. Полученные зависимости позволяют прогнозировать в заданный момент периода стойкости волнистость на круге и определить условия ее снижения. Волнистость на рабочей поверхности круга будет уменьшаться, если выполняется условие:

$$-\frac{\pi}{2} \leq \alpha_{\psi} \leq 0 \quad (18)$$

где  $\alpha_{\psi}$  - сдвиг фазы переменной составляющей износа.

Это может быть достигнуто за счет периодического изменения частоты колебаний системы "заготовка- центры" (рис.6). В этом случае волны, образовавшиеся на круге при периоде колебаний  $T_c$ , будут устраняться при обработке с увеличенным периодом  $T_c'$  ( $T_c' = T_c + \Delta T_c$ ). Величина  $\Delta T_c$ , необходимая для расчета периода колебаний  $T_c'$ , определяется из анализа условия обеспечения минимальной дисперсии профиля круга и должна лежать в пределах:

$$0 < \Delta T_c < \frac{T_c}{4} \quad (19)$$

Влияние числа проходов  
на остаточный эксцентриситет

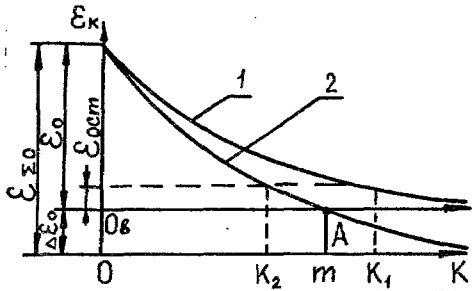


Рис. 5

Схема износа шлифовального круга при изменении частоты колебаний

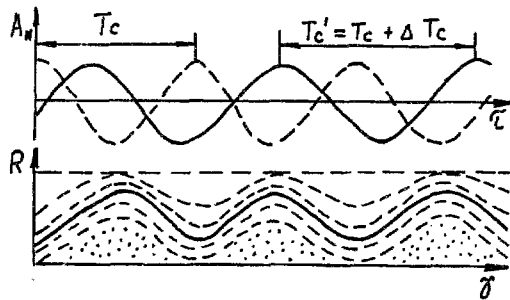


Рис. 6

На основе составленной морфологической таблицы были предложены способы управления: периодическое изменение приведенной массы системы "заготовка-центр", использование набора оправок разной массы, лжнет переменной жесткости, формирование искусственной волнистости на круге при правке, создание вынужденных колебаний  $T_C$  (А.с. N 1227426).

Установлено, что управление волнистостью на инструменте путем изменения частоты собственных колебаний системы "заготовка-центр" повышает стойкость круга более чем в 3 раза, снижает волнистость на детали в 3 раза, а шероховатость - в 1,5 раза. Предлагаемые пути реализации способа могут быть эффективно использованы на производстве.

#### ПОВЫШЕНИЕ ДОЛГОВЕЧНОСТИ ДЕТАЛЕЙ С ИЗНОСОСТОЙКИМИ ПОКРЫТИЯМИ

Точностные параметры детали с покрытием, толщина слоя после окончательной обработки, ее колебание взаимосвязаны со всеми этапами ТП: изготовление подложки - нанесение износостойкого

слоя - окончательная обработка. Однако на практике это часто не учитывается.

Разработчики, как правило, используют упрощенный подход, который сводится к тому, чтобы выбрать наиболее износостойкий материал покрытий и обеспечить рациональные условия трения контактирующих пар. Толщину наносимого слоя назначают арифметическим суммированием требуемой толщины и припуска на обработку. При этом не принимаются во внимание влияние технологических погрешностей механической обработки, последующее после эксплуатации восстановление.

В предложенной методике расчеты межоперационных размеров, припусков и колебание толщины остаточного слоя проводятся, исходя из требуемых эксплуатационных характеристик деталей с использованием теории размерного анализа ТП. При выборе режимов обработки в качестве минимизирующего параметра принята сила резания. Силы резания влияют на геометрические параметры и физико-механические свойства. К числу геометрических параметров относятся: точностные параметры, шероховатость и толщина остаточного слоя, а к физико-механическим - прочность соединения с подложкой, когезионная прочность, твердость и износостойкость. Знания о величинах сил резания при проектировании способов управления и технологических процессов изготовления деталей необходимы для предварительной оценки эффективности принимаемых решений.

В результате исследований получены зависимости, устанавливающие взаимосвязь между нормальной составляющей силы резания, зернистостью инструмента  $l_0$ , глубиной резания  $t$  и подачей  $S_x$ :

для плазменных покрытий

$$P_y = 241,9 l_0^{-0,59} t^{0,45} S_x, \quad (20)$$

для детонационных покрытий

$$P_y = 906,5 l_0^{-0,52} t^{0,67} S_x. \quad (21)$$

Установлена взаимосвязь между режимами резания и силой при точении плазменно-напыленных бронзовых покрытий:

$$P_y = 80,6 S^{0,488} t^{0,573}. \quad (22)$$

Для оценки качества покрытий (когезионной прочности) после обработки и корректировки режимов резания в случае неудовлетворительных результатов испытаний предложена новая методика (А.с. N I236443). В соответствии с ней на образец специальной конструкции наносится покрытие, контролируется толщина его слоя, проводится механическая обработка и разрушение образца с регистрацией силы. Использование известных зависимостей и методик дает возможность: спроектировать технологический процесс с минимальным количеством переходов и операций, гарантирующий изготовление качественных деталей, и установить размеры заготовки с минимально необходимыми припусками.

Важным условием повышения долговечности деталей является снижение колебания толщины остаточного слоя покрытия. Для этого существуют следующие возможные варианты. Первый вариант — снижение отклонений формы, взаимного расположения и волнистости поверхностей подложки. Второй вариант — обработка подложки с низкой точностью и обеспечение колебания толщины остаточного слоя покрытия на финишных операциях. Выбор должен осуществляться на основе технико-экономических расчетов для конкретных условий производства. Разработка способов управления может выполняться как с использованием методики, описанной выше, так и совершенствованием и последующей адаптацией известных решений с учетом особенностей технологии изготовления деталей с покрытиями.

Наиболее ярко влияние исходных погрешностей заготовки (подложки) на толщину остаточного слоя покрытия проявляется у нежестких валов. Использование в качестве аналога способа изготовления нежестких деталей (патент RU N 2004990 C1), описанного ранее, позволило получить новое решение. Оно заключается в том, что на заготовку (подложку) цилиндрической формы наносится слой покрытия с обеспечением седлообразности. Взаимная компенсация погрешностей на этапе обработки сокращает колебание толщины остаточного слоя и дает возможность назначать более производительные режимы резания.

Использование в качестве аналога способа ускоренного исправления эксцентриситета (А.с. N 770754) (рис.5) и

последующая корректировка с помощью фонда эвристических приемов дало возможность разработать также новое решение. Спроектированный способ (патент RU N 2004661 C1) позволяет управлять одновременно эксцентриситетом готовой детали и колебаниями толщины остаточного слоя покрытия. Это достигается созданием дополнительного эксцентриситета при выполнении условия:

$$\varphi = \arccos((E_1^2 + E_2^2 - \Lambda_0^2)/2 \cdot E_1 \cdot E_2), \quad (23)$$

где  $E_1$  и  $E_2$  соответственно эксцентриситет подложки и смещение оси заготовки на финишной операции;  $\Lambda_0$  - эксцентриситет детали;  $\varphi$  - угол между  $E_1$  и  $E_2$ .

Способ дает возможность в отдельных случаях уменьшить колебание толщины остаточного слоя в 3 раза и снизить требования к точности изготовления подложки в 2 раза по сравнению с традиционной технологией.

#### РЕАЛИЗАЦИЯ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИИ В ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Отдельные результаты теоретических и экспериментальных исследований были адаптированы к производственным условиям, опробованы и внедрены. В частности:

- автоматизированная система "Творчество", ориентированная на поиск эффективных и патентоспособных способов обработки, оснастки и инструментов, внедрена в Республиканском центре новых информационных технологий и включена в банк данных;
- прикладные программы для расчета точностных параметров деталей на операциях точения, фрезерования и круглого шлифования (завод топливных насосов, АО "Алтайдизель"; отраслевая лаборатория САПР, Мосстанкин);
- автоматизированный стенд сбора и обработки данных о процессах механической обработки (завод топливных насосов АО "Алтайдизель");
- способ контроля точностных параметров деталей (НПО "Вектор", Барнаул);
- способ изготовления жестких деталей; при обработке сокращено время на 30% при сохранении отклонений от цилиндричности в пре-

- делах допуска ( Рубцовский машиностроительный завод);
- способ фрезерования с различными углами в плане и со стабилизацией угла контакта "инструмент-обрабатываемая поверхность"; отклонения от плоскостности и волнистость уменьшены в 1,3-1,6 раза при сокращении времени обработки на 10% (ПО "Луч", Барнаул);
  - шлифование на чередующихся оправках равной жесткости, но разной массы; стойкость инструмента возросла в 3,4 раза, отклонения от круглости уменьшились в 1,5 раза ; шероховатость поверхности снизилась в 1,7 раза. (Барнаулский станкостроительный завод);
  - ТП изготовления ответственных деталей двигателей внутреннего сгорания (детали топливной аппаратуры и коленчатые валы), усовершенствованные на основе предложенного подхода и методологии функционально-стоимостного анализа ; трудоемкость снижена в среднем на 30%, расход абразивного инструмента - на 50% (ПО "Барнаултрансмаш");
  - ТП изготовления деталей с покрытиями для автоматических роторных линий (АРЛ);сроки простоя сокращены на 10-15% (Барнаулский станкостроительный завод).
  - ТП, оборудование и оснастка для изготовления шкивов с износостойкими рабочими поверхностями комбайнов "Дон-1500". (ПО "Ростсельмаш").

Годовой экономический эффект от внедрения результатов исследований составил 358092 руб. (в ценах 1991 г.)

#### ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1. Разработанная автоматизированная методика проектирования инструментов, оснастки и способов управления точностью обработки дает возможность находить перспективные и патентоспособные решения для различных методов обработки. Методика базируется на основных положениях теории поискового конструирования и функционально-стоимостного анализа: учитываются свойства, законы и закономерности развития систем рассматриваемого класса, прогнозная информация.

2. Морфологические таблицы, составленные на основе анализа



больших массивов известных решений, могут быть ориентированы на управление отдельными точностными параметрами деталей, на управление составляющими погрешности (упругие деформации, износ, вибрация и т.д.) или на метод обработки. Возможно использование таблиц смешанного класса. Расширение таблиц для последующего синтеза и поиска перспективных решений необходимо проводить с использованием сформированного фонда эвристических приемов и методов инженерного творчества.

3. Структура математических моделей (ММ) независимо от метода обработки должна соответствовать структуре анализируемой технической системы, предназначенной для управления точностью. В структуре ММ формообразования целесообразно использовать алгоритм, основанный на решении уравнения баланса перемещений в технологической системе станка. Каркасный подход позволяет эффективно использовать, дополнять и развивать существующий фонд ММ. Разработанные математические модели дают возможность не только рассчитывать точностные параметры деталей, но и проводить имитационное моделирование разрабатываемых способов, оснастки и инструментов.

4. Использование разработанной методики проектирования позволило синтезировать широкий спектр решений, обеспечивающих контроль (А.с. N 1768947) и управление отклонениями от цилиндричности деталей. Получены как известные, так и новые решения: самоподнастраивающиеся резцы (А.с. N 1745412, N 1780931), применение которых при точении по сравнению с традиционными снижает отклонения от цилиндричности более чем в 3,5 раза; резцы с корпусами из полимербетонов, которые обладают повышенными диссипативными свойствами и имеют в 5-7 раз меньшую стоимость, чем металлические. Способ изготовления нежестких валов (патент RU N 2004990 CI), заключающийся в создании искусственной погрешности профиля на предшествующей шлифованию операции точения, повышает производительность и снижает отклонения от цилиндричности в отдельных случаях более чем в 5 раз.

5. Применение морфологических таблиц для синтеза способов

управления отклонениями от плоскостности и волнистостью при торцовом фрезеровании позволило получить решения, обладающие признаками патентной чистоты. Обеспечение постоянства угла контакта при обработке заготовок сложной конфигурации уменьшает в 3,5 отклонения от плоскостности (положительное решение на выдачу патента по заявке N 5038139/08). Выбор значений углов в плане режущих зубьев и порядка их установки в корпусе фрезы с учетом динамических характеристик системы, позволяет на порядок снизить амплитуду преобладающей гармоники в рассматриваемом спектре колебаний технологической системы (патент RU N 2005006 Cl).

6. Ускорение процесса исправления эксцентриситета и радиального биения у деталей возможно не только за счет увеличения жесткости элементов технологической системы станка. Создание предварительного смещения оси наружной поверхности заготовки относительно оси вращения (А.с. N 770754) ускоряет исправление погрешности по сравнению с традиционным шлифованием в 2-3 раза.

7. Расчет параметров точности шлифованных деталей и последующее управление с целью обеспечения их стабильности возможно только на основе анализа процесса как силового взаимодействия инструмента и заготовки, профили и взаимное положение которых имеют случайный характер и постоянно изменяются с течением времени. Расчет точности целесообразно выполнять в три этапа: 1) определение радиус-вектора заготовки с учетом погрешности ее установки; 2) последовательное вычисление по съему металла массивов радиус-векторов шлифуемой поверхности, начиная с первого оборота заготовки до момента снятия припуска; 3) расчет параметров точности по массиву радиус-векторов детали.

8. Основными причинами нестабильности отклонений от круглости и волнистости деталей являются вибрация, отклонения профиля рабочей поверхности круга и технологическая наследственность. У инструмента значимы амплитуды первой и высокочастотных преобладающих гармоник, возникающие в течение периода стойкости. Полученные расчетные зависимости позволяют определить высоту волн на инструменте с учетом его характеристики и режимов резания.

9. Спроектированные способы управления волнистостью на инструменте путем изменения частоты собственных колебаний системы "заготовка-центры" и созданием вынужденных колебаний (А.с. N 1227426) повышают стабильность процесса шлифования. Стойкость круга возрастает более чем в 3 раза, волнистость на детали снижается в 3 раза, а шероховатость - в 1,5 раза. Предлагаемые пути реализации способа могут быть эффективно использованы на производстве.

10. Предложенная методика разработки и совершенствования ТП изготовления деталей с покрытиями и способ управления толщиной остаточного слоя за счет смещения оси наружной поверхности относительно оси вращения (патент RU N 2004991 С1) уменьшает колебания толщины рабочего слоя в 2,5-3 раза, что приводит к увеличению ресурса изделия на 15%.

11. Разработанные методика, программные модули, способы управления, технологическая оснастка и режущие инструменты обеспечивают стабильность точностных параметров деталей, высокую долговечность и снижение затрат. Их использование в ТП изготовления ответственных деталей машин (топливные насосы, двигатели внутреннего сгорания, автоматические роторные линии, шкивы клиноремennых передач) позволило получить общий экономический эффект 358092 рубля (в ценах 1991 года).

#### ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ ОПУБЛИКОВАНЫ В СЛЕДУЮЩИХ РАБОТАХ

1. Новоселов Ю.К., Татаркин Е.Ю. Обеспечение стабильности точности деталей при шлифовании. - Саратов:Изд-во Саратов. ун-та, 1988. - 128 с.

2. Новоселов Ю.К., Татаркин Е.Ю. Обеспечение точности в автоматизированном производстве.- Киев: Знание, 1989.- 24 с.

3. Технологическое обеспечение качества изготовления деталей с износостойкими покрытиями /С.П.Кулагин, С.Л.Леснов, Ю.К.Новоселов, Е.Ю.Татаркин. - Новосибирск: Изд-во Новосиб.

ун-та. 1993. - 209 с.

4. Татаркин Е.Ю., Леонов С.Л., Рощупкин П.В. Методика прогнозирования профиля абразивного инструмента в процессе шлифования // Качество поверхности и эксплуатационные свойства деталей машин и приборов: Тез. докл. науч.-техн. конф. - Новосибирск, 1982, с.57-58.

5. Татаркин Е.Ю. Контроль основных параметров процесса шлифования, влияющих на качество обработки деталей // Измерение и контроль при автоматизации производственных процессов: Тез. докл. Всесоюз. научн.-техн. конф. - Барнаул, 1982, с.183

6. Татаркин Е.Ю. Кулагин С.П. Комплексное исследование процесса плоского шлифования // В кн.: Измерение и автоматизация производственных процессов. - Барнаул, 1983, с.94-95.

7. Татаркин Е.Ю. Малеев О.Ю. Обеспечение стабильности качества на операциях шлифования // В кн.: Отделочно-чистовые методы обработки и инструменты в технологии машиностроения. - Барнаул, 1984, с.123-128.

8. Татаркин Е.Ю., Рощупкин П.В. Характеристика абразивного инструмента и изменение его профиля за период стойкости // В кн.: Чистовая обработка деталей машин. - Саратов, 1985, с.47-51.

9. Татаркин Е.Ю. Методика расчета ожидаемой точности обработки на шлифовальных станках // В кн.: Отделочно-чистовые методы обработки и инструменты в технологии машиностроения. - Барнаул, 1985, с.33-40.

10. Кулагин С.П., Татаркин Е.Ю. Шлифование напыленной керамики // Теория и практика газотермического нанесения покрытий: Тез. докл. Всесоюз. совещ. - М., 1985, с.239-241.

11. Новоселов Ю.К., Татаркин Е.Ю., Малеев О.Ю. Повышение стабильности работы шлифовального круга // Вестник машиностроения, 1986, № 9, с.43-44.

12. Татаркин Е.Ю. Изучение формообразования деталей на шлифовальных станках // В кн.: Повышение качества обработки, сборки деталей автомобилей и тракторов. - М., МАМИ, 1986., с.184-188.

13. Новоселов Ю.К., Татаркин Е.Ю. Снижение эксцентриситета

шлифованных деталей // В кн.: Технология и автоматизация машиностроения. Республ.межвед.науч.-техн. сб., - Киев, 1987, вып. 39, с.75-80.

14.Татаркин Е.Ю. Анализ влияния профиля рабочей поверхности шлифовального круга на точность обработки // В кн.: Процессы и оборудование абразивно-алмазной обработки. - М.,ВЗМИ, 1986, с.79-82.

15.Кулагин С.П., Леонов С.Л., Татаркин Е.Ю. Финишная обработка шкивов клиноременных передач // В кн.: Процессы и оборудование абразивно-алмазной обработки. - М., ВЗМИ, 1987, с.36-40.

16.Татаркин Е.Ю. Перспективные направления обеспечения точности обработки // Разработка и промышленная реализация новых механических и физико-химических методов обработки: Тез.докл.Всесоюзн.научн.-техн. конф. - М., МВТУ, 1988, с.253-254.

17.Татаркин Е.Ю. Точность обработки с позиций системного анализа // В кн.: Отделочно-чистовые методы обработки и инструменты автоматизированных производств. - Барнаул, 1989, с.83-90.

18.Марков А.М., Татаркин Е.Ю. Автоматизированный синтез конструкций сборных торцовых фрез // Выбор конструкций и режимов резания при эксплуатации прогрессивного твердосплавного инструмента : Тез.докл. науч.-техн. конф.,- Екатеринбург, 1990, с.12-13.

19.Татаркин Е.Ю.,Федорова Н.П., Ситников А.А. Определение межоперационных размеров при изготовлении деталей с покрытиями //Сварочное производство, 1991, N 12, с.5-6.

20.Татаркин Е.Ю. Интенсификация творческого труда проектировщиков //Специалисты АлтПИ - промышленности страны: Тез.докл. юбилейной науч.-практ. конф.,- Барнаул, 1992, с.12-13.

21.А.с. N 770754 (СССР). Способ круглого шлифования с адаптивным управлением точностью формы поперечного сечения детали/Ю.К. Новоселов и Е.Ю.Татаркин.-Опубл. в Б.И., 1980, N 38.

22.А.с. N 918796 (СССР). Устройство для измерения колебаний при шлифовании/Е.Ю.Татаркин, С.Л.Леонов и А.П.Скляров.- Опубл. в Б.И., 1982 N 13.

23. А.с. N 921821 (СССР). Установка для исследования образования отклонений формы деталей при шлифовании/ Ю.К.Новоселов и Е.Ю.Татаркин.- Оpubл. в Б.И., 1982, N 15.

24. А.с. N 992174 (СССР). Устройство для измерения длительности контакта зерна с металлом при шлифовании /С.Л.Леонов, В.Я.Майданский, А.П.Склярлов и Е.Ю.Татаркин.- Оpubл. в Б.И., 1983, N 3.

25. А.с. N 1227426 (СССР). Способ шлифования /Ю.К.Новоселов, Е.Ю.Татаркин и О.Ю.Малеев. -Оpubл. в Б.И., 1986, N 16.

26. А.с. N 1236443 (СССР). Способ определения прочности покрытия и устройство для его осуществления /С.П.Кулагин, В.Г.Кусидис, Е.Ю.Татаркин.- Оpubл. в Б.И., 1986, N 21.

27. А.с. N 1235709 (СССР). Сборный абразивный инструмент /Б.К.Новоселов, А.П.Склярлов, И.А.Глущенко, С.Л.Леонов, Е.Ю.Татаркин, О.Ю.Малеев и С.П.Кулагин. - Оpubл. в Б.И., 1986, N 21.

28. А.с. N 1745412 (СССР). Резец /Е.Ю.Татаркин, Ю.В.Головнев и С.В.Черепанов. - Оpubл. в Б.И., 1992, N 25.

29. А.с. N 1768947 (СССР). Способ контроля топографии поверхностей деталей /Е.Ю.Татаркин, А.А.Ситников, А.М.Марков, Ю.В.Головнев и В.М.Воронец. - Оpubл. в Б.И., 1992, N 38.

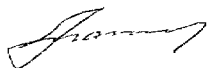
30. А.с. N 1780931 (СССР). Резец. /Е.Ю.Татаркин, Ю.В.Головнев, А.А.Ситников и А.М.Марков. - Оpubл. в Б.И., 1992, N 46.

31. Патент RU N2004990 CI. Способ изготовления нежестких деталей /Е.Ю.Татаркин, А.А.Ситников.- Оpubл. в Б.И., 1993, N47-48.

32. Патент RU N 2005006 CI. Способ обработки деталей торцовой фрезой /Е.Ю.Татаркин, А.М.Марков, Ю.В.Головнев и Д.О.Грабарев- Оpubл. в Б.И., 1993, N 47-48.

33. Патент RU N2004991 CI. Способ изготовления деталей с покрытиями /Е.Ю.Татаркин, А.А.Ситников.- Оpubл. в Б.И., 1993, N 47-48.

34. Способ обработки деталей переменной ширины./Е.Ю.Татаркин, А.М.Марков, Д.О.Грабарев, Н.И.Терешкина. Положительное решение о выдаче патента по заявке N 5038139/08.



Отпечатано в издательстве АГТУ.

П.л I      Заказ 227      Тираж 70.

---

Бесплатно

Барнаул.

1995.