

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ УКРАИНЫ

Одесский политехнический университет

На правах рукописи

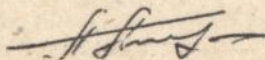
ЛИНЧЕВСКИЙ ПАВЕЛ АДАМОВИЧ

ТОНКОЕ РАСТАЧИВАНИЕ В СТРУКТУРЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ  
ОПЕРАЦИЙ ОБРАБОТКИ ТОЧНЫХ ОТВЕРСТИЙ

Специальность 05.02.08 - Технология машиностроения

А В Т О Р Е Ф Е Р А Т

диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук



Одесса 1993

15210  
Работа выполнена в Одесском политехническом университете

Научный консультант - заслуженный деятель науки и техники  
Украины, доктор технических наук,  
профессор А.В.ЯКИМОВ

Официальные оппоненты: доктор технических наук, профессор  
Ю.Н.КЮЗНЕЦОВ

доктор технических наук, профессор  
Ю.К.НОВОСЕЛОВ

доктор технических наук, профессор  
Ю.Н.СУХОРУКОВ

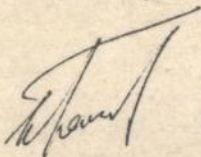
Ведущая организация - научно-производственное объединение  
"Кислородмаш", г.Одесса

Защита диссертации состоится "28" сентября 1993г.  
в 14<sup>00</sup> на заседании специализированного совета Д 05.06.01  
при Одесском политехническом университете по адресу:  
270044, г.Одесса, проспект Шевченко, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке университета.

Автореферат разослан "9" августа 1993

Ученый секретарь совета,  
профессор



И.М.Белоконов

ЛННБ України ім.В.Стефаника



00815723 (Q)

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Переход к рыночным отношениям в экономике выдвинул на передний план проблемы, связанные с выпуском конкурентоспособной продукции машиностроения. В свою очередь, высокий уровень требований к современным машинам обусловил ряд проблем, связанных с технологией обработки деталей машин. Повышение физико-механических характеристик прочности, твердости и износостойкости конструкционных материалов определило общую тенденцию к снижению их обрабатываемости, что приводит к повышенному износу инструмента, увеличению усилий, деформаций и температур резания, а следовательно — к снижению точности обработки и качества обработанных поверхностей. Множество проблем обусловлено конструктивными особенностями деталей машин. Постоянное стремление к уменьшению материалоемкости конструкций приводит к снижению жесткости и виброустойчивости деталей в процессе обработки. Сложность конфигурации деталей вызывает неравномерные упругие деформации в процессе резания и соответствующие им погрешности обработки. В этих условиях особую актуальность приобретают технологии, основанные на снятии тонких стружек, что обеспечивает малые усилия резания, деформации деталей и высокую их точность.

Общие проблемы обработки значительно усугубляются в процессе получения точных отверстий, что связано с неблагоприятными условиями резания и уменьшением жесткости инструмента. Параметры точности обработки и качества поверхности отверстий формируются на всем протяжении технологического процесса с учетом разных задач, решаемых на этапах черновой, чистовой и отделочной обработки. При этом достижение эффекта одновременного повышения производительности, экономичности, точности обработки и качества поверхностей деталей всегда было и будет в дальнейшем одним из главных направлений развития технологии машиностроения.

В связи с изложенным актуальной является крупная научно-техническая проблема, решение которой направлено на создание научных основ технологии обработки точных отверстий, поиск путей и методов повышения эффективности технологического процесса их получения, разработку новых способов управления предшествующей и окончательной обработкой отверстий, расширение технологических возможностей сдвигания и режущего инструмента.

В общем объеме теоретических и экспериментальных исследований основное внимание уделено технологии тонкого растачивания отверстий на алмазно-расточных (отделочно-расточных) станках, так как операция тонкого растачивания является, с одной стороны, практически единственной, обеспечивающей при высокой производительности обработки высокую точность размеров, формы, прямолинейности и пространственного расположения осей отверстий, а с другой стороны эта же операция остается менее других изученной как теоретически, так и экспериментально. Среди предшествующих операций выделен процесс сверления, как основной при обработке отверстий в сплошном материале. При этом, учитывая достаточную степень его изученности, настоящие исследования были направлены главным образом на научную разработку методов управления процессом. Указанные технологические операции в сочетании с тонким пластическим деформированием поверхности отверстий, которое поддается совмещению с тонким растачиванием на алмазно-расточных станках, охватывают и обеспечивают практически полный диапазон требований к точным отверстиям деталей машин.

**Цель работы.** Целью настоящей работы является повышение эффективности обработки точных отверстий, включающей производительность, экономичность, точность и качество обработанных поверхностей, на основе разработки и реализации теории, технологии, управления и новых способов тонкого растачивания с учетом структурно связанных с ним операций предшествующей и последующей обработки.

**Методы исследования.** Теоретические исследования проводились на базе научных основ технологии машиностроения, теории резания металлов, теории трения и износа, теории динамики станков, теории механических колебаний, теории управления технологическими процессами, теоретических основ физики твердого тела, основ теплофизики механической обработки, теории вероятностей и математической статистики, а также современной теории и практики моделирования процессов.

Экспериментальные исследования проводились на основе разработанных автором и стандартных методик, базирующихся на широком использовании теории активного эксперимента, методов моделирования и статистических испытаний.

Достоверность теоретических и экспериментальных исследова-

ний подтверждается результатами опытно-промышленной проверки и внедрения в производство.

Автор защищает научные основы повышения общей эффективности обработки точных отверстий на основе разработки и реализации теории, технологии, управления и новых способов тонкого растачивания с учетом структурно связанных с ним операций предшествующей и последующей обработки, включающие:

1. Теорию и методологию расчета величины предельного износа лезвийного инструмента без проведения стойкостных испытаний на основе установления взаимосвязей между износом и параметрами динамической системы.

2. Теорию нового способа управления операциями предварительной обработки, основанного на взаимосвязи режимов резания с величиной предельного износа инструмента.

3. Классификацию технологических схем тонкого растачивания отверстий, учитывающую совмещение обработки черновыми и чистовыми резцами в сочетании с инструментом для тонкого пластического деформирования поверхности.

4. Теорию метода деления подачи между двумя чистовыми резцами и новые способы его реализации, учитывающие диагностику состояния режущих кромок в результате износа.

5. Комплекс результатов теоретических и экспериментальных исследований по тонкому растачиванию отверстий в жестких деталях при многошпиндельной обработке и в деталях пониженной жесткости при одношпиндельной обработке.

6. Теорию и технологию совмещения тонкого растачивания с операциями подрезки торцов и тонкого пластического деформирования поверхности отверстий.

7. Теорию и результаты исследований новых способов управления точностью обработки в процессе тонкого растачивания.

Научная новизна. Системный подход к решению проблемы дал новые научные результаты:

1. Впервые выдвинуто новое научное положение о возможности определения величины предельного износа лезвийного инструмента расчетным путем на основе установления взаимосвязи износа с параметрами динамической системы.

2. Сформулированы и введены новые технологические понятия о предельном и переменном предельном износе инструмента.

3. Разработаны научные основы теории расчета предельного

износа инструмента и нового способа управления операциями предварительной обработки.

4. Научно обоснованы пути и методы повышения эффективности операций тонкого растачивания, предусматривающие совмещение обработки: черновым и чистовым резцами; двумя чистовыми резцами; несколькими шпиндельными узлами; расточным и подрезным резцами; расточными резцами и деформирующим инструментом.

5. Впервые предложена новая научная гипотеза о причине возникновения и механизме поддержания автоколебаний при резании.

6. Получила дальнейшее развитие теория влияния относительных колебаний детали и инструмента на точность обработки отверстий и шероховатость обработанной поверхности.

7. Впервые выдвинуто и практически реализовано в новом способе управления точностью тонкого растачивания научное положение о возможности компенсации размерного износа инструмента его температурным удлинением.

**Практическая ценность.** Проведенные исследования позволили разработать основы инженерных расчетов точности обработки отверстий, качества обработанных поверхностей, производительности и экономичности обработки. При этом наибольшую практическую ценность представляют следующие результаты:

1. Способ управления операциями предварительной обработки отверстий, позволяющий повышать производительность и снижать себестоимость обработки.

2. Метод деления подачи при тонком растачивании отверстий и способы его практической реализации, позволяющие одновременно повышать производительность обработки, точность размеров и формы отверстий, качество обработанных поверхностей.

3. Экспериментальные данные по многошпиндельному тонкому растачиванию, позволяющие эффективно осуществлять концентрацию операций при проектировании наладок отделочно-расточных станков с учетом заданной точности обработки.

4. Схемы базирования, закрепления и методы расчета деформаций деталей пониженной жесткости от усилий закрепления и резания.

5. Технологии совмещения операций тонкого растачивания отверстий с подрезкой торцов осевой подачей и конструкторско-технологические методы устранения вибраций на этапах подрезки и выкашивания торцов.

6. Расчеты и технология совмещения операций тонкого раста-

чивания и пластического деформирования поверхности отверстий.

7. Способы управления точностью обработки отверстий на отделочно-расточных станках и их конструкторско-технологическое обеспечение.

**Реализация результатов.** Результаты работы внедрены в отрасли станкостроения при проектировании специальных отделочно-расточных станков головным в отрасли специальным конструкторским бюро алмазно-расточных станков (г. Одесса) и их изготовлении в Одесском станкостроительном производственном объединении. Применяются указанные станки во всех отраслях машиностроения.

Отдельные научные результаты используются в учебном процессе.

Годовой экономический эффект от частичного внедрения результатов работы составляет 419748 рублей в ценах 1990 года.

Кроме того, результаты исследования операций предварительной обработки отверстий внедрены в НПО "Кислородмаш" (г. Одесса).

**А п р о б а ц и я р а б о т ы.** Основные положения и результаты работы докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях и семинарах различного, в том числе и международного (Алушта, 1991) уровня: Одесса, 1969, 1972, 1973, 1980, 1981, 1982, 1984, 1985; Кданов, 1980; Пермь, 1982, 1984, 1988; Омск, 1986; Ереван, 1986; Алушта, 1991.

Результаты работы рассматривались на технических советах СКБ алмазно-расточных станков в 1987 и 1990 годах.

В полном объеме диссертация доложена и одобрена на кафедре "Технология машиностроения" Одесского политехнического института при участии кафедр "Инструментальные системы автоматизированного производства" и "Металлорежущие станки".

**П у б л и к а ц и и.** По материалам диссертации опубликовано 38 работ, в том числе монография и 8 авторских свидетельств.

**С т р у к т у р а и о б ъ е м р а б о т ы.** Работа состоит из введения, шести глав, основных результатов и выводов, списка литературы и приложений. Общий объем работы 423 страницы, в том числе: 314 страниц машинописного текста, включающего 17 таблиц; 114 рисунков на 75 страницах; 237 наименований литературных источников и 2 приложения на 34 страницах.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность работы, изложена ее структура, показана научная и практическая ценность, а также изложены основные положения, выносимые на защиту.

Первая глава посвящена анализу современного состояния исследуемой проблемы и формированию задач, решение которых необходимо для достижения поставленной цели исследований.

На основе анализа работ ряда ведущих, в том числе и зарубежных, ученых, а также представителей созданных ими школ в областях точности механической обработки, состояния поверхностного слоя и его влияния на эксплуатационные свойства деталей машин, перспективных технологических методов обеспечения заданных параметров, точности обработки и шероховатости поверхности, технологического управления этими параметрами, технологии обработки точных отверстий с учетом всей структуры технологического процесса, производительности и экономичности обработки сделаны следующие выводы:

1. В систематизированной структуре операций обработки точных отверстий тонкое растачивание занимает особое место. По точности размеров формы и расположения осей отверстий, а также по производительности обработки, эта операция превосходит другие чистовые и отделочные методы. По достижимой шероховатости поверхности тонкое растачивание уступает ряду методов отделочной обработки. Вместе с тем процесс тонкого растачивания является наименее изученным по сравнению с другими операциями.

2. Все операции, предшествующие тонкому растачиванию (сверление, рассверливание, зенкерование, черновое, получистовое и чистовое растачивание), изучены достаточно полно. Наименее исследованной является область управления этими операциями с целью повышения, как правило, производительности и экономичности предшествующей обработки. Вопросы управления могут быть рассмотрены на примере самой распространенной операции сверления с учетом последующих обобщений на другие операции.

3. Отсутствуют способы управления процессами лезвийной обработки, в том числе и операцией сверления, обеспечивающие устойчивость процесса обработки и основанные на принципе максимального использования работоспособности режущего инструмента.

4. Существует взаимосвязь величины и скорости износа не только с режимами резания, но и с уровнями колебаний в технологи-

ческой системе. Однако в литературе отсутствуют количественные и качественные характеристики, определяющие эту взаимосвязь.

5. Отсутствуют теоретические и экспериментальные зависимости величин износа инструмента от параметров обработки и свойств технологической системы, при которых происходит потеря устойчивости процесса обработки.

6. Основные особенности операции тонкого растачивания, связанные с высокими скоростями резания, малыми глубинами резания и подачами обуславливают небольшие величины упругих перемещений элементов технологической системы и переводят процесс в область малых величин погрешностей обработки, с трудом поддающихся предварительному теоретическому анализу и учету.

7. Имеется классификация конструкторских наладок отделочно-расточных станков, включающая 90 схем. При этом ошибочно отождествляются схемы компоновок станков с технологическими схемами обработки отдельных отверстий. Кроме того, известные схемы не учитывают возможности совмещения различных операций в одной рабочей позиции станка.

8. Многочисленные исследования, направленные на получение зависимостей для расчета шероховатости поверхности, не подтверждаются в зоне режимов тонкого растачивания. Кроме того, при очень малых подачах наблюдается не снижение, а увеличение высоты неровностей.

9. Известные пути повышения производительности тонкого растачивания, как правило, приводят к потере точности обработки и ухудшению качества обработанной поверхности. Методов, основанных на комплексном повышении эффективности операции по производительности, точности и шероховатости поверхности нет.

10. Существует ряд проблем, связанных с тонким растачиванием отверстий в деталях пониженной жесткости:

- не решены вопросы расчета и устранения или уменьшения упругих деформаций при закреплении заготовок и резании;

- недостаточно разработаны эффективные способы повышения точности обработки и качества поверхности растачиваемых отверстий;

- не в полной мере выявлены причины возникновения и механизм поддержания колебаний при резании;

- недостаточно изучена взаимосвязь погрешностей форм отверстий и шероховатости поверхности с параметрами

11. Управление точностью обработки отверстий на отделочно-расточных станках затруднено в связи с отсутствием точных и надежных методов и измерительных средств, позволяющих получать информацию о ходе технологического процесса.

12. Не установлены закономерности управления точностью обработки путем изменения режимов резания для условий отсутствия информации о текущих размерах отверстий в ходе обработки.

13. Из числа операций последующей обработки притирка, хонингование и калибрование отверстий являются несовместимыми с тонким растачиванием непосредственно на отделочно-расточных станках и могут выполняться последовательно за растачиванием на специальном или универсальном станочном оборудовании.

14. Алмазное выглаживание и раскатывание отверстий по технологическим схемам и диапазонам режимов обработки полностью совместимы с операцией тонкого растачивания и могут быть реализованы посредством размещения режущего и деформирующего инструментов в одной расточной бортанге. Вместе с тем отсутствуют надежные рекомендации по проектированию таких совмещенных операций.

15. Эффективность отделочно-расточных операций может быть значительно повышена в результате совмещения тонкого растачивания с подрезкой наружных или внутренних торцов. Однако наиболее производительный и наименее изученный способ подрезки торцов осевой подачей применяется ограниченно в связи с отсутствием надежных методов устранения возникающих в процессе резания вибраций.

Таким образом, в настоящее время имеются значительные неисследованные возможности повышения общей эффективности обработки точных отверстий, что и предопределило цель данной работы. Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

1. На основе анализа взаимосвязей между износом инструмента и параметрами упругой динамической системы разработать и экспериментально проверить теорию и методологию определения расчетным путем величины предельного износа.

2. Установить зависимости предельного износа инструмента от режимов обработки и на их основе разработать теорию, методику и рекомендации по реализации нового способа управления

операциями предварительной обработки отверстий.

3. Разработать методику определения периода стойкости инструмента, работающего на переменных режимах резания до начала катастрофического износа, с учетом использования стандартных стойкостных зависимостей и постоянных значений критерия притупления.

4. Разработать основы классификации технологических схем обработки отверстий на отделочно-расточных станках и теоретические основы совмещения обработки отверстий несколькими резаками и шпиндельными узлами.

5. Систематизировать схемы закрепления деталей пониженной жесткости и разработать методики расчета погрешностей обработки от усилий закрепления и резания.

6. Установить причины вынужденных колебаний и механизм возникновения автоколебаний при резании, их параметры и влияние на точность обработки и шероховатость поверхности в условиях тонкого растачивания.

7. Разработать основы совмещения операций тонкого растачивания отверстий с подрезкой точных торцов и с операциями тонкого пластического деформирования поверхности отверстий.

8. Разработать основы теории и практики нового способа управления точностью продольного профиля отверстий при тонком растачивании с учетом взаимного влияния износа и температурного удлинения резцов.

9. Обобщить полученные результаты теоретических и экспериментальных исследований и внедрить их в производство.

В т о р а я г л а в а посвящена разработке теории и технологии управления операциями предварительной обработки отверстий с учетом динамической модели предельного износа инструмента на примере операции сверления.

В основу разработки положена следующая логика: управление производительностью и себестоимостью обработки связано с интенсификацией режимов резания; режимы резания связаны с величиной предельного износа инструмента и скоростью его износа; износ инструмента в свою очередь связан с вибрациями в технологической системе; предельный износ, как правило, сопровождается потерей устойчивости процесса обработки. Указанные взаимосвязи позволяют предположить, что, изменяя режимы резания в процессе обработки, можно смещать величину предельного износа в сторону больших его

значений, а контроль достижения предельного износа можно с высокой степенью точности увязать с потерей устойчивости процесса. Кроме того, т.к. виброустойчивость технологической системы поддается теоретическим расчетам, то возникает возможность определения величины предельного износа инструмента без проведения дорогостоящих и трудоемких стойкостных испытаний.

Возможность широких обобщений и разработка общей динамической модели процесса механической обработки базируются на том, что кинематика большинства металлорежущих станков основана на использовании механизмов, сообщаящих исполнительным органам только два простейших движения – вращательное и поступательное. Сочетания и количественные соотношения этих двух движений определяют все известные виды обработки металлов резанием. Таким образом, с точки зрения кинематики технологические охемы точения, растачивания, сверления, зенкерования или развертывания одинаковы и отличаются лишь направлением осей координат, относительно которых совершаются главные и вспомогательные движения. В свою очередь, с точки зрения динамики процесса различные виды механической обработки отличаются главными составляющими усилия резания, которые вызывают колебания (смещения) элементов упругой системы.

Обобщая изложенное, любой процесс механической обработки можно представить в виде одноконтурной замкнутой динамической системы, элементами которой являются эквивалентная упругая система и процесс резания. Разорвав одну из связей, можно исследовать влияние параметров процесса резания (например, величины износа) на параметры динамической системы, определяющие ее устойчивость.

В соответствии с теорией автоматического управления и регулирования передаточная функция разомкнутой системы определяется следующим выражением:

$$W_{раз}(p) = \frac{K_p K_{ус} (1 + (T_\alpha - T_\gamma) p + T_\alpha T_p p^2)}{(1 + T_p p) (T_1^2 p^2 + T_2 p + 1)}, \quad (I)$$

где  $K_p$  – коэффициент резания;  $K_{ус}$  – приведенная статическая характеристика упругой системы;  $T_1$  – инерционная постоянная времени;  $T_2$  – постоянная времени демпфирования;  $T_p$  – постоянная времени стружкообразования;  $T_\alpha$  – постоянная времени заднего угла;  $T_\gamma$  – постоянная времени переднего

угла;  $P$  - оператор дифференцирования по времени.

С точки зрения изучения взаимосвязей износа инструмента с параметрами динамической системы определяющей является постоянная времени заднего угла

$$T_{\alpha} = \frac{h^2 H_{\alpha}}{2VK}, \quad (2)$$

где  $h$  - величина флюски износа по задней поверхности инструмента;  $H_{\alpha}$  - контактная жесткость между задней поверхностью инструмента и обрабатываемой заготовкой;  $V$  - скорость резания;  $K$  - удельная сила резания.

В процессе обработки с ростом значения износа происходит непрерывное увеличение постоянной времени заднего угла  $T_{\alpha}$ , что приводит к росту передаточной функции  $W_{\text{раз}}(P)$ . Увеличение модуля передаточной функции снижает запас устойчивости динамической системы и постепенно приводит к потере ее устойчивости, что соответствует началу развития катастрофического износа инструмента. С учетом критерия устойчивости Найквиста определено значение износа по задней поверхности инструмента для границы устойчивости системы:

$$h_{\text{гп}} = \sqrt{E \frac{A+B}{D}},$$

$$\text{где } A = \frac{5,06 a^4 H (K_a)^4}{C} + \frac{6,75 a^3 H^2 (K_a)^3}{C^2} + \frac{4,5 a^2 H M (K_a)^2}{C^2}; \quad (3)$$

$$B = \frac{2,25 b_8 b a M K_a^2}{C^3 V} (1,5 a H \frac{K_a}{V} - M); \quad E = \frac{1,33 C V^2}{H_{\alpha} a b K_a};$$

$$D = 3,37 a^3 \left(\frac{K_a}{V}\right)^3 + 4,5 a^2 \frac{H (K_a)^2}{C} + \frac{1,5 a (H^2 - M) K_a}{C}.$$

Данное значение износа, при котором технологическая (динамическая) система начинает терять устойчивость, названо предельным износом инструмента. Для его определения необходимы следующие исходные данные:  $V$  - скорость резания;  $a$  - толщина срезаемого слоя;  $b_8$  - временное сопротивление материала заготовки;  $b$  - длина режущих кромок (ширина стружки);

$K_a$  - коэффициент утолщения стружки;  $H_{\alpha}$  - контактная жесткость между инструментом и заготовкой;  $M$  - приведенная масса системы;  $C$  - жесткость системы;  $H$  - коэффициент

демпфирования колебаний.

По теоретической зависимости (3) построены и сопоставлены с экспериментальными графики изменения предельного износа спиральных сверл от режимов обработки. Значения предельного износа увеличиваются с ростом скорости резания, а увеличение подачи приводит к их снижению. С технологической точки зрения такой вывод дает основания для введения нового понятия — "переменный предельный износ инструмента" и определяет возможность управления процессом на основе изменения скорости резания и подачи.

Ввиду того, что предельный износ является средним износом по длине режущих кромок инструмента, введено понятие коэффициента среднего износа  $K_{и}$ , связывающего значение предельного износа с максимальным (катастрофическим) износом  $\bar{h}_k$  на отдельных участках кромок (вершина реза, уголки сверла) и определяемого следующим образом:

$$K_{и} = \bar{h}_{пр} / \bar{h}_k . \quad (4)$$

Используя стандартные стойкостные зависимости  $T = f(V, S)$ , полученные для нормативных значений критериев притупления инструмента  $\bar{h}_{кр}$ , и, учитывая, что действительный износ, при котором наступает потеря устойчивости процесса обработки, значительно превосходит  $\bar{h}_{кр}$ , время работы инструмента до начала катастрофического износа можно определять по зависимости:

$$T_T = \frac{\bar{h}_{пр} - \bar{h}_0}{K_{и} \bar{h}_{кр} - \bar{h}_0} T , \quad (5)$$

где  $\bar{h}_0$  — среднее значение износа в момент окончания обработки инструмента.

На основании установленных взаимосвязей между величиной предельного износа и режимами резания разработан способ управления операциями предварительной обработки, который заключается в последовательном изменении режимов резания таким образом, чтобы переменный предельный износ инструмента смещался в сторону больших значений и на всем протяжении периода стойкости оставался выше фактического среднего износа. Модель развития износа инструмента в процессе обработки с изменяющимися режимами резания по методике реализации разработанного способа показана на рис. 1. Процесс обработки эффективно начинать с постоянной подачи  $S_1$  (наибольшей из изменяемых подач) и переменной скоростью резания от  $V_1$  до  $V_N$ , т.к. с ростом скорости ре-

вания производительность обработки возрастает. При износе инструмента, равном  $\bar{h}_{пр}(V_N, S_1)$  производится изменение подачи с  $S_1$  на  $S_2$ , что соответствует предельному износу  $\bar{h}_{пр}(V_{к2}, S_2)$ . Дальнейшая обработка ведется со скоростями резания в диапазоне  $V_{к2} < V < V_N$ . Значение скорости  $V_{к2}$  определяется из условия  $\bar{h}_{пр}(V_{к2}, S_2) = \bar{h}_{пр}(V_N, S_1)$ . Обработка ведется до тех пор, пока предельный износ инструмента не достигнет значения  $\bar{h}_{пр}(V_N, S_M)$ .

Период стойкости инструмента  $T_{\Sigma}$ , достигшего величины износа  $\bar{h}_{пр}(V_N, S_M)$ , суммируется по участкам  $I^1 - I^2 - 2 - \dots - j' - j - \dots - M' - M$  и определяется по формуле

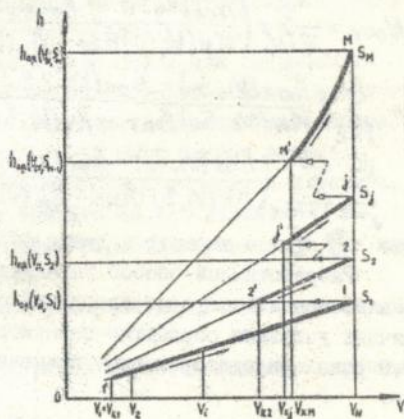


Рис. 1. Модель развития износа инструмента при реализации способа управления процессом обработки ( $S_1 > S_2 > \dots > S_j > \dots > S_M$ )

$$T_{\Sigma} = \frac{\bar{h}_{пр}(V_i, S_1) - \bar{h}_0(V_i, S_1)}{K_{и}(V_i, S_1)\bar{h}_{кр} - \bar{h}_0(V_i, S_1)} T(V_i, S_1) + \sum_{i=2}^M \left( \frac{\bar{h}_{пр}(V_i, S_1) - \bar{h}_{пр}(V_{i-1}, S_1)}{K_{и}(V_i, S_1)\bar{h}_{кр} - \bar{h}_0(V_i, S_1)} T(V_i, S_1) \right) + \sum_{j=2}^M \sum_{l=k+1}^N \left( \frac{\bar{h}_{пр}(V_i, S_j) - \bar{h}_{пр}(V_{i-1}, S_j)}{K_{и}(V_i, S_j)\bar{h}_{кр} - \bar{h}_0(V_i, S_j)} T(V_i, S_j) \right) \quad (6)$$

Так как управление осуществляется путем изменения режимов резания, то в течение всего периода стойкости инструмента производительность  $\Pi$  и себестоимость  $C$  обработки также являются переменными величинами и могут быть оценены по своим средним значениям, приходящимся на одно получаемое отверстие:

$$C = \frac{1}{N_{отв}} (E(T_M + T_{ин} + T_B) + S_{и}); \quad \Pi = \frac{N_{отв}}{T_{шт}} \quad (7,8)$$

где  $E$  — себестоимость станкоминуты;  $T_M$ ,  $T_{ин}$ ,  $T_B$  — машинное время, время на замену и подналадку затупившегося инструмента, вспомогательное время всего цикла управления;

$S_{и}$  — затраты, связанные с эксплуатацией инструмента;

$N_{отв}$  - количество отверстий, обработанных за весь цикл управления;  $T_{шт}^4$  - суммарное штучное время цикла. Количество обработанных отверстий при этом вычисляется по следующей формуле:

$$N_{отв} = \frac{1}{\pi D \ell} \left( \frac{\bar{P}_{пр}(V_1, S_1) - \bar{P}_0(V_1, S_1)}{K_H(V_1, S_1) \bar{P}_{кр} - \bar{P}_0(V_1, S_1)} V_1 S_1 T(V_1, S_1) + \right. \\ \left. + \sum_{i=2}^N \left( \frac{\bar{P}_{пр}(V_i, S_i) - \bar{P}_{пр}(V_{i-1}, S_i)}{K_H(V_i, S_i) \bar{P}_{кр} - \bar{P}_0(V_i, S_i)} V_i S_i T(V_i, S_i) \right) + \right. \\ \left. + \sum_{j=2}^M \sum_{i=k+1}^N \left( \frac{\bar{P}_{пр}(V_i, S_j) - \bar{P}_{пр}(V_{i-1}, S_j)}{K_H(V_i, S_j) \bar{P}_{кр} - \bar{P}_0(V_i, S_j)} V_i S_j T(V_i, S_j) \right) \right), \quad (9)$$

где  $D, \ell$  - диаметр и длина обрабатываемых отверстий.

Разработанный способ управления экспериментально проверен и реализован на операции сверления отверстий, что позволило в различных условиях обработки повысить производительность в 1,4 + 3,0 раза при одновременном снижении себестоимости в 1,6 + 3,5 раза.

Третья глава посвящена разработке основ технологии тонкого растачивания отверстий и методов повышения эффективности данной операции.

Разработка основ классификации технологических схем обработки точных отверстий на отделочно-расточных станках базируется на четком разделении конструкторских и технологических признаков операции, сочетание которых порождает бесконечное число вариантов конструкций специальных станков. Но во всем множестве конструкторских вариантов встречается ограниченное количество решений, направленных на обработку отдельно взятых отверстий. Основными технологическими признаками различных схем обработки являются:

- виды обрабатываемых отверстий (сквозные, глухие, гладкие, ступенчатые и т.д.);
- выполняемые этапы обработки (черновая, чистовая);
- совмещение или последовательное выполнение этапов;
- виды выполняемых технологических переходов или операций (расточивание, подрезка торцов, тонкое пластическое деформирование);
- совмещение операций (переходов).

Следует отметить, что понятие "черновая обработка" для операции тонкого растачивания введено условно и не имеет ничего общего с обычной черновой обработкой. С учетом изложенных техно-

логических признаков и последующего ряда упрощений предложена классификация, включающая всего 14 схем обработки и позволяющая создавать любой сложности многоместные, многопозиционные, последовательные, параллельные и параллельно-последовательные схемы конструкторских наладок (структур операции).

Предложенная классификация служит базой для разработки основ технологического проектирования операций тонкого растачивания отверстий. Рекомендуемая последовательность технологического проектирования включает следующие укрупненные этапы:

1. Анализ и установление технических требований к детали до и после выполнения операции тонкого растачивания.

2. Выбор технологической схемы обработки отдельно для каждой оси обрабатываемых отверстий.

3. Анализ возможностей одновременной обработки всех поверхностей.

4. Разработка структуры операции с учетом заданной производительности обработки.

5. Выбор типоразмеров шпиндельных головок.

6. Выбор конструкции и размеров расточных борштанг.

7. Расчет податливости системы шпиндель-борштанга с целью решения вопроса о необходимости применения и о выборе типа виброгасителя.

8. Выбор типа резцов, материала их режущей части и геометрических параметров.

9. Назначение режимов резания.

По всем перечисленным этапам изложены необходимые рекомендации со ссылками на литературу, включая работы автора.

Ряд технологических схем предусматривает различные варианты совмещения обработки отверстий двумя одновременно работающими резцами. При этом схемы совмещения обработки черновым и чистовым резцами, которые делят между собой припуск, хорошо известны и часто встречаются на практике. Повышение производительности в этом случае всегда сопровождается снижением точности обработки и качества поверхности отверстий из-за влияния чернового резца на перемещения чистового резца. С целью повышения точности обработки в подобных схемах следует применять известный метод разворота резца на угол  $\beta \approx 135^\circ$ , при котором вектор усилия резания  $\vec{P} = \vec{P}_z + \vec{P}_y$  от чернового резца был бы направлен перпен-

дикулярно радиусу, соединяющему вершину чистового резца и ось борштанги. Тогда влияние черного резца на точность обработки будет минимальным.

В развитие теории и практики совмещенной обработки при тонком растачивании предложен новый метод, названный методом деления подачи. Сущность метода заключается в выставлении двух чистовых резцов на одинаковый размер обработки и расположении их вершин в направлении подачи на расстоянии

$$l = (n + 0,5) S, \quad (I0)$$

где  $n$  — любое целое число, в том числе и 0;  $S$  — подача в мм/об.

При установке резцов под углом разворота  $\theta^\circ$

$$l = \left( n + 0,5 - \frac{\theta^\circ}{360} \right) S. \quad (II)$$

Теоретически метод равноценен односторонней обработке с подачей  $S' = S/2$ , подставляя которую в известную формулу для расчета шероховатости поверхности, получим:

$$R_z = \frac{(S/2)^2}{8r} = \frac{S^2}{32r}. \quad (I2)$$

Анализ формулы (I2) показывает, что при реализации метода с условием сохранения неизменной шероховатости поверхности подача может быть увеличена в 2 раза, или при неизменной подаче шероховатость поверхности может быть уменьшена в 4 раза.

Из различных вариантов (способов) практической реализации метода деления подачи для условий тонкого растачивания рекомендован вариант противоположного размещения двух одинаковых резцов в одном диаметральном отверстии борштанги при  $l = 0$ . В этом случае процесс деления подачи выполняется автоматически при любых численных значениях подачи и оба резца работают в одинаковых условиях резания и износа. Кроме того, такой вариант установки резцов снижает погрешности обработки, связанные с упругими деформациями и колебаниями технологической системы.

Из анализа деформаций системы в вертикальном (сечения I,3) и горизонтальном (сечения 2,4) направлениях получены следующие зависимости для расчета погрешностей формы поперечного сечения отверстий:

одностороннее растачивание

$$\Delta \varphi n = (P_{y1} \omega_1 + P_{y3} \omega_3) - (P_{y2} \omega_2 + P_{y4} \omega_4); \quad (I3)$$

двухрезцовое растачивание

$$\Delta \varphi_n = \left( \left| \sum_{i=1}^2 \bar{P}_{yi}(\omega_1) \right| + \left| \sum_{i=1}^2 \bar{P}_{yi}(\omega_3) \right| - \left( \left| \sum_{i=1}^2 \bar{P}_{yi}(\omega_2) \right| + \left| \sum_{i=1}^2 \bar{P}_{yi}(\omega_4) \right| \right) \right), \quad (14)$$

где  $P_y$  - радиальная оставляющая усилия резания;  $\omega$  - подаτικότητα технологической системы.

Так как векторная сумма сил от двух противоположных резцов в любом положении инструмента близка к нулю, то точность формы отверстий повышается.

Аналогично получены зависимости для расчета смещения оси расточенных отверстий и погрешностей их размера:

однорезцовое растачивание

$$\Delta c_o = \frac{P_{y1}\omega_1 - P_{y3}\omega_3}{2}; \quad \Delta_D = P_{y1}\omega_1 + P_{y3}\omega_3; \quad (15, 16)$$

двухрезцовое растачивание

$$\Delta c_o = (P_{y \max}(1) - P_{y \min}(2))\omega_{\min}; \quad \Delta_D \approx 0. \quad (17, 18)$$

В результате решения дифференциального уравнения движения системы шпиндель-Борштанга с учетом выражений, описывающих изменение во времени внешней силы для случаев однорезцовой обработки и двухрезцового растачивания делением подачи, получены соответствующие зависимости для расчета величин изгибных колебаний инструмента:

$$y_1 = \frac{1}{Mf} \left( K t_{\min} + K \frac{\Delta t}{2} \right) \frac{1}{\lambda^2 + f^2} \left( f + \lambda e^{\lambda t} \sin f t - f e^{\lambda t} \cos f t \right) + \frac{1}{Mf} K \frac{\Delta t}{2} \frac{1}{\lambda^4 + 2\lambda^2(\omega^2 + f^2) + (\omega^2 + f^2)^2} \left( 2\omega f \lambda \cos \omega t - f(\omega^2 - \lambda^2 - f^2) \sin \omega t + \omega(\omega^2 + \lambda^2 - f^2) \sin f t + \lambda(\lambda^2 + \omega^2 + f^2) e^{\lambda t} \cos f t \right); \quad (19)$$

$$y_{1-2} = \frac{1}{Mf} K \frac{\Delta t}{2} \frac{1}{\lambda^4 + 2\lambda^2(\omega^2 + f^2) + (\omega^2 + f^2)^2} \left( 2\omega f \lambda \cos \omega t - f(\omega^2 - \lambda^2 - f^2) \sin \omega t + \omega(\omega^2 + \lambda^2 - f^2) \sin f t + \lambda(\lambda^2 + \omega^2 + f^2) e^{\lambda t} \cos f t \right), \quad (20)$$

где  $M = \frac{C}{4\pi^2 f^2}$  - приведенная масса системы;  $C$  - жесткость;  $H$  - коэффициент демпфирования колебаний;  $f = \sqrt{\frac{C}{M} - \frac{H^2}{4M^2}}$  - собственная частота колебаний системы;  $\lambda$  - декремент затухания колебаний;  $K$  - коэффициент пропорциональности между силой резания и глубиной резания;  $\Delta t = t_{\max} - t_{\min}$  - смещение припуска на обработку;  $t_{\min}$  - минимальная глубина резания;  $\omega$  - частота вращения

шпинделя. Из анализа формул (19) и (20) следует, что  $U_{1-2} < U_1$ . Поэтому возможно уменьшение износа инструмента, а следовательно — повышение точности обработки и улучшение качества поверхности отверстий.

Серия многочисленных экспериментов, результаты которых приведены в работе, подтвердила обоснованность теоретических выводов и эффективность применения метода деления подачи в условиях тонкого растачивания.

Область применения предложенного метода не ограничивается вариантом противоположного размещения резцов. На практике метод деления подачи может быть реализован в виде различных способов обработки как внутренних, так и наружных поверхностей с использованием совмещенной или последовательной схемы расположения резцов. Однако в любом случае эффективность метода зависит от точности процесса деления срезаемого припуска в направлении подачи. Вследствие действия целого ряда причин, таких как неточности заточки резцов, погрешности их настройки, нестабильность свойств инструментального материала и т.д., условия протекания процесса резания и темп износа на каждом из резцов могут оказаться различными. Поэтому первоначальный эффект от деления подачи через определенный промежуток времени может быть в значительной мере утрачен.

Предложены несколько способов повышения эффективности обработки методом деления подачи. Первый из них заключается в следующем (рис. 2).

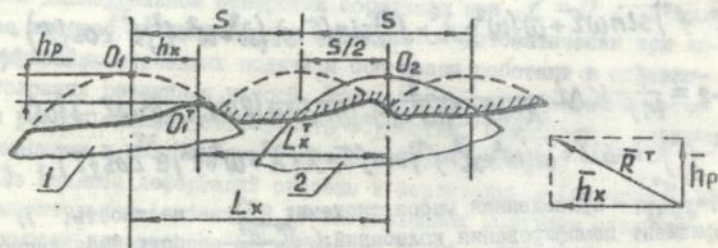


Рис. 2. Схема формирования составляющих вектора рас-  
согласования для корректировки положения  
вершин резцов.

В процессе обработки через время  $T$  от ее начала, или от предыдущей поднастройки контролируется расстояние между вершинами резцов в осевом и радиальном направлениях, определяются составляющие вектора  $\bar{R}^T$  смещения вершины первого резца  $\bar{R}_x^T$  и  $\bar{R}_p^T$ , после чего производится корректировка положения второго резца путем смещения его вершины на величину вектора рассогласования  $\bar{R}^T = \bar{R}_x^T + \bar{R}_p^T$  в противоположном направлении. При этом осевое расстояние между вершинами резцов восстанавливается от величины  $L_x^T$  до требуемой величины  $L_x$ , а радиальное смещение вершин становится равным нулю. В случае необходимости оба резца согласованно перемещаются в радиальном направлении до заданного уровня настройки.

Второй способ аналогичен первому, но еще более эффективен, так как учитывает изменение профиля первого резца в результате его повышенного износа по сравнению со вторым резцом (рис. 3).

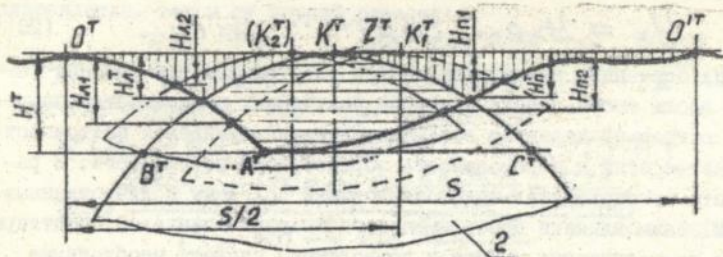


Рис. 3. Схема определения положения вершины второго резца, обеспечивающего наилучшее перекрытие остаточного гребешка после первого резца контуром второго резца

Сущность способа заключается в дополнительном осевом смещении второго резца таким образом, чтобы итоговая высота неровностей после обработки двумя резцами получалась минимальной. Вектор дополнительного смещения  $\bar{e}^T$  определяется при наложении контура второго резца на профиль остаточного гребешка  $O^T A^T O'^T$ , имеющий высоту  $H^T$ , так, чтобы слева и справа от второго резца оставались неровности одинаковой высоты, т.е. чтобы выполнялось условие  $H_n^T = H_n^T$ .

Кроме вариантов совмещения обработки несколькими резцами рассмотрена возможность совмещения растачивания несколькими

шпиндельными головками. В общем случае при  $n$  шпиндельных головках, расположенных произвольно на одном мостике отделочно-расточного станка, их взаимное влияние на точность обработки может быть оценено по величине динамических прогибов моста в рассматриваемом сечении  $X$ :

$$y_x = \frac{P}{6EJ} \left( \frac{(ab - a^2 + l^2)bx^3 - 3ab^2lx^2}{l^3} - X^2(X - 3a) \right) \frac{1}{1 - (T/T_p)^2} \cdot (2I)$$

где  $P$  - раскачивающая сила от шпиндельной головки, расположенной на расстояниях  $a$  и  $b$  от левой и правой опор моста;  $l$  - длина пролета моста;  $T$  - период собственных колебаний системы;  $T_p$  - период раскачивающей силы.

Динамический прогиб в произвольном сечении моста на расстоянии  $X$  от левой опоры от одновременного действия  $n$  сил (шпинделей) определяется выражением:

$$y_x = y_{xP_1} + y_{xP_2} + \dots + y_{xP_n}. \quad (22)$$

На основании анализа вариантов расстановки шпиндельных головок вдоль моста станка с учетом полученных зависимостей определен ожидаемый характер взаимного влияния шпинделей на точность формы отверстий и шероховатость обработанной поверхности. В результате экспериментальных исследований получены количественные оценки взаимовлияния одновременно работающих шпинделей, подтверждающие теоретические выводы и позволяющие сделать необходимые рекомендации для практики.

В четвертой главе рассмотрен комплекс проблем, связанных с теорией и технологией тонкого растачивания отверстий в деталях пониженной жесткости.

Предложена классификация деталей пониженной жесткости, включающая 5 типов (кольца, гильзы, осекопильные детали, мембранные детали, радиальноконсольные детали). Одни из них являются тонкостенными в радиальном, а другие - в осевом направлении. При этом условно принято считать тонкостенными детали, у которых толщина стенок не превышает  $1/5$  диаметра обработки.

На примере комплексной детали, которая состоит из характерных элементов всех 5 типов деталей пониженной жесткости, выполнена сравнительная оценка 18 различных схем их закрепления.

Для исследования погрешностей формы отверстий от усилий закрепления и резания в качестве основной расчетной модели

выбрана гладкая гильза, находящаяся под воздействием множества радиальных сосредоточенных сил. Эти силы  $P$  равномерно распределены как по окружности ( $K$  сил), так и по длине  $L$  гильзы ( $n$  сил). Из теории тонкостенных оболочек получено и решено следующее дифференциальное уравнение:

$$\frac{\partial^2 W}{\partial \varphi^2} + \gamma R \frac{\partial^2 W}{\partial x^2} = \frac{12MR^2(1-\gamma^2)}{ET^3}, \quad (23)$$

где  $W$  - величина радиальной деформации;  $R$  - радиус оболочки (гильзы);  $\gamma$  - коэффициент Пуассона;  $M$  - момент, изгибающий оболочку;  $E$  - модуль упругости;  $T$  - толщина стенки гильзы;  $\varphi, x$  - независимые переменные, определяющие угловое и осевое положение места нахождения деформаций.

Получено общее решение уравнения (23), пригодное при изменении граничных условий для расчета деформаций как от условий закрепления, так и от усилий резания:

$$W(\varphi, x) = W_0 + \frac{6M(1-\gamma^2)}{ET^3\gamma} (Lx - x^2) \left( \frac{4W_0}{\pi} + \frac{6ML^2(1-\gamma^2)}{ET^3\gamma} \right) \sin \frac{\pi x}{L} \cos \frac{\pi R \varphi \sqrt{\gamma}}{L} \quad (24)$$

Граничные условия и  $W_0$  при закреплении:

$$W(\varphi_0, x_0) = 0; \quad \varphi_0 = 2\pi/K; \quad x_0 = L/(n-1); \quad (25)$$

$$W_0 = \frac{6ML^2(1-\gamma^2)}{ET^3\gamma} \left( \sin \frac{\pi}{n-1} \cos \frac{2\pi^2 R \sqrt{\gamma}}{LK} - \frac{n-2}{(n-1)^2} \right) \cdot \left( 1 - \frac{4}{\pi} \sin \frac{\pi}{n-1} \cos \frac{2\pi^2 R \sqrt{\gamma}}{LK} \right) \quad (26)$$

Граничные условия и  $W_0$  при резании:

$$W(\varphi_0, x_0) = 0; \quad \varphi_0 = 2\pi/K; \quad x_0 = \frac{L}{2(n-1)}; \quad (27)$$

$$W_0 = \frac{3MRL^2(1-\gamma^2)\pi \cos \frac{\pi}{2(n-1)} \cos \frac{2\pi^2 R \sqrt{\gamma}}{LK} \pi \sin \frac{\pi}{2(n-1)} \sin \frac{2\pi^2 R \sqrt{\gamma}}{LK} - \frac{n}{R(n-1)\sqrt{\gamma}}}{2ET^3\sqrt{\gamma} \left( \frac{R\sqrt{\gamma}}{\pi} \sin \frac{\pi}{2(n-1)} \sin \frac{2\pi^2 R \sqrt{\gamma}}{LK} - \cos \frac{\pi}{2(n-1)} \cos \frac{2\pi^2 R \sqrt{\gamma}}{LK} \right)} \quad (28)$$

Аналогичные расчетные зависимости получены и для более сложного случая деформации консольно-мембранной детали. Разработаны также расчетные формулы для определения изгибающего момента, учитывающие 7 различных вариантов контакта поверхности детали с зажимными элементами приспособления.

Ввиду того, что при обработке отверстий в деталях пониженной жесткости существенно возрастает роль относительных колебаний инструмента и заготовки, в работе детально исследованы причины возникновения как вынужденных колебаний от различных источников, так и автоколебаний. Для таких источников вынужденных

колебаний, как неравномерная податливость заготовки, неуровненность вращающихся масс, огранка тел качения и волнистость дорожек качения подшипников, неравномерность натяжения ремней привода, пульсации в гидросистеме и т.д. приведены формулы для расчета амплитуд колебаний и экспериментально определены коэффициенты их передачи в зону обработки.

Так как при растачивании отверстий в деталях пониженной жесткости как правило нежестким бывает и расточной инструмент, для определения уровня относительных вынужденных колебаний принята расчетная схема в виде системы двух упруго связанных колеблющихся масс в среде вязкого трения, на которую действует возмущающая сила синусоидального типа. Для этой схемы составлена и решена система дифференциальных уравнений, получены и экспериментально проверены следующие зависимости для расчета амплитуд колебаний детали и инструмента:

$$A_d = \frac{P C_0}{(C_0^2 - H_d^2 \frac{C_d}{m_d})(H_n^2 \frac{C_n}{m_n} - C_0)} \sqrt{\left(H_n^2 \frac{C_n}{m_n} - H_d H_n \sqrt{\frac{C_d C_n}{m_d m_n}}\right)^2 + \left(H_d^2 \frac{C_d}{m_d} - H_d H_n \sqrt{\frac{C_d C_n}{m_d m_n}}\right)^2} \quad (29)$$

$$A_n = \frac{P H_n H_d}{(C_0^2 - H_d^2 \frac{C_d}{m_d})(H_n^2 \frac{C_n}{m_n} - C_0)} \sqrt{\frac{H_n^2 C_n^2 C_d}{m_n^2 m_d} + \frac{H_d^2 C_d^2 C_n}{m_d^2 m_n}} \quad ; \quad (30)$$

$$A_{\max} = A_d + A_n \quad ; \quad (31)$$

где  $C_0$  - коэффициент вязки.

На основе анализа недостатков одиннадцати основных гипотез, объясняющих возникновение автоколебаний при резании, предложена новая научная гипотеза о причине возникновения и механизме поддержания автоколебаний. Суть ее состоит в том, что с учетом асимметричного характера силового взаимодействия атомов обрабатываемого материала при их взаимном сближении и удалении в зоне режущего лезвия вначале возникает сближение атомов на расстояние меньше критического и генерируется всплеск сил отталкивания реза от детали, а затем при удалении реза удаляются друг от друга ранее сблившиеся атомы на расстояние больше критического и силы отталкивания резко падают. При этом инструмент и деталь снова сближаются под действием упругих восстанавливающих сил и колебательный процесс повторяется. С учетом изложенной теории получена следующая зависимость для расчета амплитуды автоколебаний:

$$A_k = \sqrt{\frac{a N}{|1 - \frac{C_n}{m_n}|(m+1)(r_d - 2 \cos \beta \sin \frac{\pi V}{2}) \sin^{m-1} \beta}} \quad ; \quad (32)$$

где  $a, m$  — физические атомные постоянные обрабатываемого материала;  $N$  — число пар взаимодействующих атомов;  $C_n, m_n$  — жесткость и масса инструмента;  $l_a$  — исходное расстояние между слоями атомов в кристаллической решетке;  $\beta$  — приведенный результирующий угол перемещения атомов под округлением режущего лезвия по отношению к направлению скорости резания  $V$ .

Предложен комплекс расчетных зависимостей, определяющих влияние колебаний на погрешности формы и шероховатость поверхности отверстий.

Все теоретические разработки проверены и подтверждены экспериментально, что позволило сделать ряд практических рекомендаций по обработке деталей пониженной жесткости.

В пятой главе изложены основы технологии совмещения операций на отделочно-расточных станках. В качестве перспективных для совмещения с тонким растачиванием рассмотрены операции подрезки торцов осевой подачей, раскатывания и алмазно-го выглаживания поверхности отверстий.

В результате проведенного анализа установлено, что в процессе съема основного припуска при подрезке торцов потеря виброустойчивости системы связана с недостаточной ее жесткостью, а в процессе выхаживания торцов — с недостаточной глубиной резания, вызывающей смятие металла. В связи с этим на основе теории, изложенной во второй главе, получено выражение для расчета максимальной ширины подрезаемого торца при известной жесткости приспособления:

$$\beta \leq \frac{T_1^2 T_2 + T_2^2 T_p + T_2 T_p^2}{1,5 K_a C_B T_1^2 T_p K_{ус} M_{тр}} \quad (33)$$

где  $M_{тр}$  — коэффициент трения стружки о переднюю поверхность резца.

Для устранения вибраций в процессе выхаживания как наиболее эффективный предложен метод ограничения времени при выхаживании торцов. Кроме этого предложен ряд конструкторско-технологических методов комплексного решения проблемы виброустойчивости системы и даны практические рекомендации по совмещению операций растачивания отверстий и подрезки торцов.

С целью улучшения качества поверхности отверстий рассмотрен комплекс вопросов по технологическому обеспечению совмещения тонкого растачивания с тонким пластическим деформированием поверхности. Задача уменьшения шероховатости поверхности без изме-

нения достигнутых растачиванием параметров точности формы и волнистости поверхности решается за счет выбора радиуса деформирующего инструмента, меньшего из двух следующих условий:

$$R < \rho'; \quad R < \rho. \quad (34)$$

В этих условиях  $\rho', \rho$  - радиусы кривизны поперечной и продольной волны, определяемые по формулам:

$$\rho' = R_0 + \frac{a \max(a \max - 2R_0 \cos \frac{3f_B}{2fk})}{2(a \max + R_0(1 - \cos \frac{3f_B}{2fk})}); \quad \rho = \frac{\lambda^2}{4\pi^2 a}, \quad (35, 36)$$

где  $\lambda$  - длина продольной волны;  $a$  - амплитуда продольной волны;  $R_0$  - радиус геометрически правильной окружности (радиус расточенного отверстия);  $a \max$  - максимальная амплитуда круговой волны;  $f_B$  - круговая частота вращения инструмента;  $f_k$  - частота относительных колебаний инструмента и детали.

Получены также зависимости для расчета нормальной оставляющей усилия деформирования, необходимого только для смятия шероховатости поверхности и усилия настройки пружины с учетом центробежной силы, действующей на упруго закрепленный деформирующий элемент. Кроме этого, определены оптимальное расстояние между вершинами резца и деформирующего элемента и величина оптимальной подачи для совмещенной обработки.

Экспериментальная проверка подтвердила эффективность совмещения растачивания с пластическим деформированием поверхности отверстий. При работе с оптимальными режимами и геометрией инструмента шероховатость поверхности после деформирования находится примерно в следующем соотношении с шероховатостью поверхности после растачивания:

$$R_{Zd} = \frac{r}{R} R_{Zp}, \quad (37)$$

где  $r, R$  - радиусы резца и деформирующего элемента.

Шестая глава посвящена разработке и экспериментальному исследованию новых способов управления точностью обработки отверстий на операции тонкого растачивания. На основе анализа обобщенной модели управления в качестве наиболее перспективных выбраны методы основанные на изменении режимов резания и стабилизации деформаций технологической системы в процессе обработки.

Из большого числа факторов, влияющих на точность обработки, для условий высокой точности и жесткости отделочно-расточных

станков выделены 2 главных – размерный износ и температурное удлинение резцов. Для разработки нового способа управления точностью размеров и формы продольного профиля отверстий использованы следующие положения:

1. Размерный износ и температурное удлинение резцов вызывает появление противоположных по направлению погрешностей обработки.

2. Каждый из указанных факторов зависит от величины подачи.

3. В условиях прецизионной обработки величины размерного износа и температурного удлинения резцов соизмеримы между собой и поэтому возможна их взаимная компенсация.

Для управления точностью предложен следующий критерий:

$$\Delta R_{и} = \Delta R_{т} \quad , \quad (38)$$

т.е. отклонение радиуса обработки от износа резца  $\Delta R_{и}$  должно быть равно отклонению радиуса обработки от его температурного удлинения во всех сечениях по длине обработки (детали)  $l$ .

Теоретический закон изменения величины подачи по длине обработки  $S = f(l)$  может быть получен из решения уравнения:

$$\frac{U_0 \pi D \ell}{10^6 S} = \Delta L (1 - e^{-\ell / S n T_c}) \quad , \quad (39)$$

где  $U_0$  – относительный износ инструмента;  $D, \ell$  – диаметр и длина отверстия;  $\Delta L$  – температурное удлинение резца в условиях теплового равновесия;  $n$  – частота вращения инструмента;  $T_c$  – тепловая константа.

С достаточной для практики точностью закон изменения подачи по длине обработки определяется графо-аналитически путем построения линии, соединяющей точки пересечения расчетных кривых  $\Delta R_{и}$  и  $\Delta R_{т}$  в зависимости от подачи для ряда последовательных сечений по длине детали.

Так как современные базовые отделочно-расточные станки не имеют возможности плавного изменения подачи в процессе резания, в работе предложены схема и варианты конструкции гидропривода, обеспечивающего реализацию разработанного способа управления. В связи с тем, что предлагаемые законы управления предусматривают увеличение подачи по длине детали в результате управления повышается не только точность, но и производительность обработки. Сокращение времени обработки одной заготовки определяется из выражения:

$$\Delta t = \frac{\ell}{S_0} - \frac{\ell}{S_0 + 0,5 \Delta S} \quad , \quad (40)$$

где  $\Delta S = S_t - S_0$  - приращение подачи;  $S_0, S_t$  - подача в начале и в конце обработки.

Эффективность способа экспериментально подтверждена при тонком растачивании точных отверстий в деталях из чугуна и стали в условиях дискретного и плавного изменения величины подачи.

Для условий точной обработки сквозных отверстий двухопорными борштангами пониженной жесткости разработан способ стабилизации (непрерывной компенсации) упругих деформаций борштанги на протяжении всего цикла растачивания.

В качестве критерия управления деформациями борштанги принято равенство на всей длине растачивания упругих отжатий в сечении резца от усилия резания  $P_y$  и от усилия  $F$  регулируемого толкателя, встроенного во вращающуюся опору противоположно резцу, т.е.

$$Y(P_y) = Y(F) \quad (4I)$$

Сложность управления заключается в том, что вторая опора перемещается вместе со столом станка и обрабатываемой заготовкой, в результате чего постоянно изменяется длина пролета между опорами. С уменьшением длины пролета усилие толкателя  $F$  должно плавно возрастать. Это обеспечивается формой и расположением направляющей на борштанге, которая контактирует с толкателем.

С целью реализации изложенного способа управления точностью размера и формы продольного профиля отверстий получены расчетные формулы и разработана методика определения усилия толкателя в начале и в конце обработки, рабочего хода пружины толкателя и угла наклона направляющей на борштанге.

Разработанные способы управления точностью обработки внедрены в производство в виде реальных конструкций специальных отделочно-расточных станков.

## ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

I. В диссертационной работе осуществлено теоретическое обобщение и решение крупной научно-технической проблемы, имеющей важное народнохозяйственное значение, а именно: разработаны научные основы повышения эффективности обработки точных отверстий, включающей производительность, экономичность, точность и качество обработанных поверхностей, на основе разработки и реализации теории, технологии, управления и новых способов тонкого растачивания

с учетом структурно связанных с ним операций предшествующей и последующей обработки.

2. Сформулировано новое технологическое понятие о предельном износе инструмента, как износе, при котором динамическая система начинает терять устойчивость. Выдвинуто новое научное положение о возможности определения величины предельного износа лезвийного инструмента без проведения стойкостных испытаний, разработана теория и методика расчета предельного износа, основанная на его связи с параметрами динамической системы.

3. С учетом установленных взаимосвязей величины предельного износа с режимами резания введено еще одно новое технологическое понятие – переменный предельный износ инструмента, граница которого смещается при изменении скорости резания или подачи. На этой основе разработан новый способ управления операциями предварительной обработки, заключающийся в последовательном изменении скорости резания и подачи таким образом, чтобы переменный предельный износ оставался выше фактического среднего износа инструмента. Реализация предложенного способа на операции сверления позволила повысить производительность обработки в 1,4+3,0 раза при одновременном снижении себестоимости в 1,6+3,5 раза.

4. На основе разделения конструкторских и технологических признаков операции тонкого растачивания разработана классификация технологических схем обработки отверстий на отделочно-расточных станках, включающая всего 14 схем и предусматривающая широкие возможности для совмещения различных операций. Сформулированы требования к операциям, предшествующим тонкому растачиванию, и разработана последовательность технологического проектирования операций тонкого растачивания с учетом области применения различных схем обработки.

5. В развитие теории и практики совмещенной обработки при тонком растачивании предложен новый технологический метод деления подачи между двумя резами. Выполнен анализ различных вариантов (способов) его практической реализации. Теоретически установлены и экспериментально подтверждены зависимости, свидетельствующие, что противоположное размещение двух чистовых резцов уменьшает погрешности обработки, связанные с упругими деформациями и колебаниями технологической системы. На основе метода разработаны новые способы обработки, предусматривающие контроль состояния режущих кромок инструмента и учитывающие в процессе корректировки расположения резцов максимальное перекрытие остаточного

гребешка от первого резца.

6. Созданы предпосылки для повышения эффективности операций тонкого растачивания, основанные на проектировании многошпиндельных наладок. Установлен характер и степень влияния числа и места расположения на станке одновременно работающих шпинделей на точность обработки и шероховатость поверхности.

7. Решен комплекс проблем, связанных с тонким растачиванием отверстий в деталях пониженной жесткости. Систематизированы их типы и схемы закрепления. Получены расчетные зависимости, позволяющие вычислять деформации тонкостенных деталей при закреплении и резании. Установлены зависимости для расчета амплитуд и частот вынужденных относительных колебаний индустриального инструмента и детали и коэффициенты передачи колебаний от различных источников в зону обработки. Разработан ряд практических мер по обеспечению точности и качества поверхности отверстий в деталях пониженной жесткости.

8. Впервые предложена новая научная гипотеза о причине возникновения и механизме поддержания автоколебаний в процессе резания, основанная на асимметричном характере силового взаимодействия атомов обрабатываемого материала при их взаимном сближении и удалении. На ее основе получены аналитические зависимости для расчета амплитуд автоколебаний, которые в свою очередь вошли в расчетные формулы для определения точности обработки и шероховатости поверхности.

9. На основе анализа технологических схем, предусматривающих совмещение операций тонкого растачивания отверстий и подрезки торцов установлено, что главным фактором, ограничивающим применение метода осевой подачи при подрезке торцов является опасность возникновения вибраций. Для устранения или снижения уровня вибраций на различных участках цикла обработки предложены различные конструкторско-технологические решения и новые методы, основанные на ограничении времени выхаживания, введении демпфирования в крепление заготовки и применении упруго демпфирующих в осевом направлении шпиндельных узлов. На основе теории виброустойчивости получено аналитическое выражение для расчета предельно допустимых размеров подрезаемых торцов, учитывающее параметры технологической системы и условия обработки.

10. Решены проблемы, связанные с совмещением операций тонкого растачивания отверстий и тонкого пластического деформирования их поверхностей. Разработана теория расчета геометрии дефор-

мирующего инструмента, учитывающая наличие продольных и круговых волн на профиле расточенных отверстий. Получены зависимости для определения оптимального усилия деформирования и оптимальной подачи при совмещенной обработке.

II. На основе анализа взаимосвязей главных факторов, влияющих на точность обработки, о величине подачи выдвинуто новое научное положение о возможности управления точностью путем изменения подачи в процессе растачивания по закону, предусматривающему постоянную компенсацию размерного износа резца их температурным удлинением. Разработан способ управления и методика определения законов изменения подачи по длине обработки. Предложен и реализован новый способ управления точностью обработки отверстий двухопорными борштангами, основанный на изменении усилия, компенсирующего деформации борштанги в процессе растачивания по мере изменения величины пролета между опорами.

12. В процессе реализации новых разработок, направленных на решение рассматриваемой проблемы, в большинстве случаев достигнут эффект одновременного повышения производительности, экономичности, точности обработки и качества поверхности отверстий.

Основные положения диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Линчевский П.А. Тонкое растачивание стали 20Х при испытаниях резанием опытных образцов алмазно-расточных станков класса В // Тез. докл. науч.-техн. конференции по технологии машиностроения. - Одесса, 1969. - С. 89-92.

2. Линчевский П.А., Ломакин К.В. Об оценке точности алмазно-расточных станков по результатам испытаний резанием // Технология и автоматизация машиностроения: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - К.: Техника, 1973. - Вып. II. - С. 117-120.

3. Линчевский П.А. Тонкое растачивание отверстий методом распределения подачи между двумя резцами // Резание и инструмент: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - Харьков: Выща шк., 1973. - Вып. 7 - С. 27-29.

4. Линчевский П.А. Влияние податливости системы СПИД на точность алмазно-расточных станков при двухрезцовой обработке // Металлорежущие станки: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - К.: Техника, 1982. - Вып. 10. - С. 56-58.

5. Линчевский П.А. Упругие перемещения моста алмазно-расточного станка и точность обработки // Металлорежущие станки: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - К.: Техника, 1983. - Вып. II. - С. 20-22

6. Линчевский П.А., Фотти С.С. Износостойкость спиральных сверл с внутренним охлаждением / Одес. политехн. ин-т. - Одесса, 1983. - 8 с. - Деп. в УкрНИНТИ 31.08.83, № 990 - Ук 83.

7. Линчевский П.А. Изгибные колебания борштанги алмазно-расточного станка при обработке делением подачи // Металлорежущие станки: Респ. межвед. науч.-техн. об. - К.: Техника, 1984. - Вып. 12. - С. 18-20.

8. Линчевский П.А., Фотти С.С., Попов В.И. Расчет износа инструмента на основе динамической модели механической обработки // Изв. вузов. Машиностроение. - 1985. - № 2. - С. 122-124.

9. Линчевский П.А., Маркаров Г.М. Физическая природа перво-причины возникновения и механизма поддержания автоколебаний при резании / Одес. политехн. ин-т. - Одесса, 1985. - 29 с. - Деп. в УкрНИНТИ 07.06.85, № 1246 - Ук 85.

10. Линчевский П.А., Маркаров Г.М. Автоколебания при обработке деталей на металлорежущих станках // Металлорежущие станки: Респ. межвед. науч.-техн. об. - К.: Техника, 1986. - Вып. 14. - С. 31-36.

11. Линчевский П.А., Ломакин К.В. Качество поверхности при тонком растачивании отверстий в ответственных деталях машин из стали ОХНЗМФА // Технология и автоматизация машиностроения: Респ. межвед. науч.-техн. об. - К.: Техника, 1973. - Вып. II. - С. II4-II7.

12. Дубиненко А.Ф., Линчевский П.А., Шерстинский С.М. Взаимное влияние шпинделей алмазно-расточных станков на точность обработки // Технология и автоматизация машиностроения: Респ. межвед. науч. - техн. об. - К.: Техника, 1971. - Вып. 8. - С. 51-54.

13. Копелев Ю.Ф., Дубиненко А.Ф., Кравчик И.М., Линчевский П.А., Шерстинский С.М. Динамическое качество шпиндельных узлов и точность обработки при тонком растачивании // Металлорежущие станки: Респ. межвед. науч.-техн. об. - К.: Техника, 1973. - Вып. I. - С. 40-45.

14. Маталин А.А., Линчевский П.А., Ломакин К.В. Тонкое и алмазное растачивание. - К.: Техника, 1973. - 80 с.

15. Маталин А.А., Линчевский П.А. Влияние износа и температурного удлинения резцов на конусность отверстий при тонком растачивании // Вестник машиностроения. - 1974. - № 3. - С. 74-75.

16. Григорьян Г.Д., Линчевский П.А. Применение математических методов в машиностроении. - Одесса: ОПИ, 1979. - II6 с.

17. Григорьян Г.Д., Линчевский П.А., Гуляни В.П. Резцы для

чистового точения со специальной формой передней поверхности // Прогрессивные методы обработки труднообрабатываемых материалов на металлорежущих станках: Сб. материалов Всесоюзной науч.-техн. конференции. - Дднов, 1980. - С. 106-107.

18. Григорьян Г.Д., Линчевский П.А., Гутнин В.П. Высота неровностей и толщина реза при обработке резцами с цилиндрической передней поверхностью // Изв. вузов. Машиностроение. - 1981. - № 12. - С. 117-118.

19. Линчевский П.А., Фотти С.С. Исследование деформации стружки при сверлении труднообрабатываемых материалов / Одес. политехн. ин-т. - Одесса, 1986. - 21 с. - Деп. в УкрНИИТИ 27.08.86, № 2001 - Ук 86.

20. Линчевский П.А., Фотти С.С. Управление процессом обработки глубоких отверстий // Тез. докл. науч. - техн. совещания "Совершенствование технологии изготовления глубоких отверстий в деталях из труднообрабатываемых материалов" (г. Омск, 15-16 октября 1986). - Омск, 1986. - С. 22-23.

21. Линчевский П.А. Управление точностью формы продольного сечения отверстий при обработке на алмазно-расточных станках // Металлорежущие станки: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - К.: Техника, 1987. - Вып. 15. - С. 44-45.

22. Линчевский П.А., Якимов А.А. Способ определения жесткости станков // Металлорежущие станки. Респ. межвед. науч.-техн. сб. - К.: Техника, 1988. - Вып. 16. - С. 58-59.

23. Линчевский П.А., Линчевская Я.П. Управление точностью обработки на алмазно-расточных станках с двухопорными борфитангами // Металлорежущие станки: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - К.: Техника, 1988. - Вып. 16. - С. 60-62.

24. Линчевский П.А., Замуруев А.М., Линчевская Я.П. Гидропривод переменной скорости перемещения рабочих органов алмазно-расточных станков // Металлорежущие станки: Респ. межвед. науч.-техн. сб. - К.: Техника, 1989. - Вып. 17. - С. 108-110.

25. Линчевский П.А. Конструкторско-технологические методы устранения вибраций алмазно-расточных станков при подрезке широких торцов осевой подачей // Металлорежущие станки: Респ. межвед. науч. - техн. сб. - К.: Техника, 1991. - Вып. 19. - С. 8-11.

26. Слободяник П.Т., Линчевский П.А., Фотти С.С. Стойкость спиральных сверл с внутренним охлаждением // Машиностроитель. - 1979. - № 11. - С. 23-24.

27. А.с. 320347 СССР, МКИ В 23 В 41/00. Шпиндельная головка / А.Ф.Дубиненко, П.А.Линчевский, И.А.Тенин, Э.Н.Хомченко. - 1971. - 2 с.
28. А.с. 397275 СССР, МКИ В 23 В 29/03. Расточная оправка / П.А.Линчевский, Г.М.Маркаров, Э.М.Сирота, А.М.Федоров. - 1974. - 2 с.
29. А.с. 452439 СССР, МКИ В 23 В 39/02. Алмазно-расточной станок /А.Ф.Дубиненко, П.А.Линчевский, Э.М.Сирота, В.М.Соколов. - 1975. - 4 с.
30. А.с. 1196142 СССР, МКИ В 23 В 29/034. Способ лезвийной обработки двумя резцами /П.А.Линчевский, А.Г.Дервянченко. - 1985. - 2 с.
31. А.с. 1303286 СССР, МКИ В 23 В 51/06. Сверло /П.А.Линчевский, С.С.Фотти, В.В.Галицкий. - 1987. - 3 с.
32. А.с. 1361857 СССР, МКИ В 23 15/00, В 23 В 35/00. Способ определения износа инструмента /П.А.Линчевский, С.С.Фотти. - 1987. - 5 с.
33. А.с. 1380915 СССР, МКИ В 23 41/00. Гибкий производственный модуль /Н.С.Гилка, Г.Д.Григорьян, Т. Джугурян, П.А.Линчевский, Г.М.Маркаров, А.П.Пупин. - 1988. - 3 с.
34. А.с. 1552469 СССР, МКИ В 23 В 1/00. Способ лезвийной обработки двумя резцами / А.Г.Дервянченко, П.А.Линчевский. - 1989. - 4 с.
35. Линчевский П.А. Использование температурных деформаций инструмента в процессе резания для управления точностью обработки // Тез. докл. международного науч. - техн. семинара "Проблемы резания материалов в современных технологических процессах" (г. Алушта, 4-8 октября 1991). - Харьков: ХПИ, 1991. - Ч. II. - С. 3-8.
36. Линчевский П.А., Ильященко А.А. Расширение технологических возможностей отделочно-расточных станков совмещением операций // Металлорежущие станки: Респ. межвед. науч. - техн. сб. - К.: Техника, 1992. - Вып. 20. - С. 62-65.
37. Линчевский П.А., Ильященко А.А. Совмещение операций тонкого растачивания и пластического деформирования поверхности точных отверстий // Тез. докл. конференции "Новые технологические процессы в механической обработке" (г. Одесса, 13-14 октября 1992). - Киев: Общество "Знание" Украины, 1992. - С. 19-20.

38. Линчевский П.А. Новый способ управления процессами лезвийной обработки на основе динамической модели предельного износа инструмента // Тез. докл. конференции "Новые технологические процессы в механической обработке" (г. Одесса, 13-14 октября 1992). - Киев: Общество "Знание" Украины, 1992. - С. 20-21.

УЛУ 392 192-100 Б.07.93

AB 27.904

**AB 27.904**