

ХАРЬКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

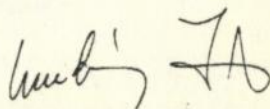
Кундрак Янош

НАУЧНЫЕ ОСНОВЫ ПОВЫШЕНИЯ ЭФФЕКТИВНОСТИ  
ЛЕЗВИЙНОЙ ОБРАБОТКИ ВНУТРЕННИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ  
ИНСТРУМЕНТАМИ ИЗ ПСТМ НА ОСНОВЕ НИТРИДА БОРА

Специальность 05.03.01 -  
Процессы механической  
обработки, станки и  
инструмент

Автореферат диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Харьков - 1996





Диссертация является рукописью

Работа выполнена в Харьковском государственном политехническом университете и в Мишкольцком университете.

Научный консультант - Заслуженный работник высшей школы Украины, доктор технических наук, профессор Грабченко Анатолий Иванович

Официальные оппоненты:

1. Заслуженный деятель науки Узбекистана, доктор технических наук, профессор Якубов Февзи Якубович
2. Доктор технических наук, профессор Внуков Юрий Николаевич
3. Лауреат государственных премий Венгерской Республики, доктор технических наук, профессор Хорват Матяш.

Ведущее предприятие: ОАО Полтавский алмазный завод, г. Полтава

Защита состоится 30 мая 1996 г. на заседании специализированного ученого совета Д 02.09.01 в Харьковском государственном политехническом университете (310002, г. Харьков, ГСП, ул. Фрунзе, 21).

ЛНБ ім. В. Стефаника  
АН України

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Харьковского государственного политехнического университета.

Автореферат разослан 29 04 1996 г.

Ученый секретарь  
специализированного ученого совета,

Узунья М. Д.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность.** В условиях рыночных отношений и все большей интеграции стран в мировую экономическую систему повышается насыщенность рынка машиностроительной продукцией. Поэтому конкурентоспособность современной продукции можно обеспечить, лишь базирываясь на таких концепциях конструирования, принципах использования наукоемких технологий и обоснованного применения нового поколения материалов, которые в совокупности позволяют получить продукцию с принципиально иным уровнем функциональных свойств.

Одной из основных предпосылок этих достижений является создание и широкое применение новых инструментальных материалов, прежде всего целой гаммы сверхтвердых материалов на основе плотных модификаций нитрида бора. Применение этих материалов в различных по назначению и конструкции инструментах позволяет решать новый класс технологических задач, достигать более высокого уровня качества изготовления деталей, а также во многом решить проблему обработки различных групп труднообрабатываемых материалов.

Существует большое количество разнообразных ответственных, например, тяжело нагруженных моментопередающих соединений, закаленные внутренние поверхности которых имеют сложный профиль. Здесь процесс растачивания материалов, имеющих высокую твердость, инструментами из ПСТМ является безусловно приоритетным процессом обработки.

Сейчас со всей очевидностью можно утверждать, что дальнейшее повышение эффективности использования потенциально высоких режущих свойств инструментов из ПСТМ, расширение существующих и определение новых областей их применения возможно лишь на основе всестороннего исследования физических явлений при взаимодействии ПСТМ с различными группами обрабатываемых материалов в современных технологических системах.

В существующих банках данных содержится запас знаний в первую очередь о традиционных инструментальных материалах обычной твердости и традиционных процессах резания. Однако применительно к сверхтвердым инструментам и технологическим процессам, базирующимся на их использовании, такая "организованная" информация и центры отсутствуют.

Опыт использования банков данных вследствие расширения применения использования компьютерной техники в настоящее время позволяет предприятиям создать свои базы данных. В связи с этим для эффективного использования лезвийных инструментов из ПСТМ необходимо иметь более полную информацию о физических закономерностях и особенностях процессов резания и создать

математические модели, позволяющие решать разнообразные технологические задачи.

**Цель работы** — создание научных основ высокоэффективных процессов лезвийной обработки внутренних поверхностей в изделиях из закаленных сталей инструментами из сверхтвердых нитридов бора, расширение областей их применения на базе использования физических и технологических закономерностей, установленных при резании, моделировании и оптимизации.

**Автор защищает:**

- Результаты комплексных экспериментальных и теоретических исследований процессов обработки закаленных сталей лезвийными инструментами на основе сверхтвердых нитридов бора в условиях равномерного и переменного резания.
- Установленные взаимосвязи основных физических закономерностей лезвийной обработки закаленных сталей инструментами из сверхтвердых нитридов бора в широком диапазоне изменения условий резания.
- Обоснование существенного различия основных характеристик процесса резания при обработке наружных и внутренних поверхностей (точении и растачивании), анализ причин, порождающих эти различия.
- Научное положение о наличии заторможенного слоя на передней поверхности инструмента из ПСТМ и его роли.
- Экспериментально установленные преимущества обработки закаленных сталей точением и растачиванием инструментом из ПСТМ в сравнении со шлифованием.
- Новый подход к теоретической оценке и прогнозированию шероховатости при обработке лезвийным инструментом из ПСТМ.
- Положение о постоянстве оптимальной температуры резания при обработке инструментами из ПСТМ для различных сочетаний скорости, подачи, глубины резания и диаметра растачивания.
- Метод исследования износа инструментов из ПСТМ с помощью поверхностной активации.
- Новые зависимости стойкости инструмента от режимов резания, охватывающую весь диапазон их изменений.
- Возможность использования инструментов из сверхтвердых нитридов бора в условиях периодического изменения сил, кинематических углов и других условий резания.
- Методику расчета с помощью многопараметрических отображений кинематических и геометрических параметров процесса резания при обработке полигонных поверхностей.
- Методологию оптимизации процесса резания закаленных сталей инструментами из сверхтвердых нитридов бора.

• Практические рекомендации по эффективной обработке закаленных сталей инструментами из сверхтвердых нитридов бора.

На защиту выносятся результаты научно-исследовательской работы и их обобщение, выполненные автором, отраженные в опубликованных работах и в настоящей диссертации, в логической совокупности представляющие собой разработку научных основ обработки закаленных сталей лезвийными инструментами из сверхтвердых нитридов бора и методологию оптимизации этих процессов.

Обоснованность и достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обусловлены комплексным подходом к изучению проблемы, структурно-логической согласованностью выполненных исследований, методологией изучения процесса - от стружкообразования до формирования поверхностного слоя, моделирования и оптимизации; применением апробированных современных и оригинальных методик экспериментального исследования; корректным использованием фундаментальных законов механики, теплофизики, статистической обработки результатов экспериментов.

#### Методы исследования

В диссертационной работе использованы теоретико-экспериментальные методы расчета и экспериментальных исследований, базирующиеся на фундаментальных положениях механики и физики твердого тела, теплофизики, возможностях электронной микроскопии, металлографии, микроспектрального анализа и др. Для аналитических исследований эффективным оказалось применение аппарата многопараметрических отображений. Использовались методы математической обработки экспериментальных исследований, выполненных на современном станочном оборудовании, оснащенном надежной контрольно-измерительной аппаратурой. В процессе исследований использовались: растровый электронный микроскоп "S150 Cambridge"; пьезоэлектрический динамометр фирмы "KISTLER"; профилометр-профилограф фирмы Perthometer ("PERTHOMETER S10 D"); инструментальные микроскопы с высокой разрешающей способностью; микротвердомеры; оптико-механическая установка для определения остаточных напряжений по методу Н.Н. Давиденкова, разработанная проф. Л. Грибовски; изохронный циклотрон АТОМКІ (активация рабочих поверхностей инструмента). Исследование геометрических и кинематических параметров процесса резания полигонных поверхностей и параметров инструмента проводилось с применением аппарата многопараметрических отображений; изотермы определялись с помощью MathCAD plus 5.0.; разработанные программы реализованы на компьютерах IBM PC.

Исследования проводились при обработке группы высокохромистых сталей, а в качестве базовой - ШХ15, закаленной до HRC 62±2. В качестве инструментальных материалов выбраны представители ПСТМ на основе нитрида бора: композит 01, композит 10, композит 10Д.

## Научная новизна

1. Впервые выполнены комплексные исследования процесса резания закаленных сталей лезвийными инструментами из сверхтвердых нитридов бора, установлены основные физические закономерности и особенности для широкого диапазона условий, в том числе при периодическом их изменении в пределах циклов обработки поверхностей сложной формы. На этой основе предложена научно-обоснованная модель, адекватно отражающая различные стороны взаимодействия сверхтвердого инструмента и обрабатываемого материала - стружкообразования, сил и температуры резания, контактных явлений, формирования поверхности и поверхностного слоя, работоспособности инструмента и др.

2. Установлена взаимосвязь основных физических закономерностей исследуемого процесса, проявляющаяся в общности трех скоростных диапазонов изменения их основных характеристик и обусловленная сочетанием уникальных свойств сверхтвердых нитридов бора и природой их физико-химического взаимодействия с закаленными сталями в процессе резания.

3. Научное положение о наличии на передней поверхности режущего инструмента из ПСТМ заторможенного слоя (налипа) как результата сложных контактных процессов, включая физико-химические, и факторе, существенно влияющем на работоспособность нитридборных инструментов. Определены скоростные диапазоны, в пределах которых происходит его зарождение, стабилизация и вырождение.

4. Подтверждена справедливость положения о постоянстве значений температуры для оптимальных скоростей резания при различных условиях в случае обработки закаленных сталей инструментами из сверхтвердых нитридов бора.

5. Сформулировано научное положение о максимальной работоспособности инструмента из сверхтвердых нитридов бора, реализуемой в сравнительно узком скоростном диапазоне при наличии налипа и оптимальной скорости резания. Отклонение от указанных диапазонов скоростей резко снижает работоспособность инструмента.

6. Разработана и реализована методика исследования износа инструмента из сверхтвердых нитридов бора с помощью их поверхностной активации. Благодаря этому повышена точность и надежность измерений износа непосредственно в процессе обработки.

7. Предложен новый подход к объяснению формирования и определению параметров шероховатости при лезвийной обработке. Разработаны теория, комплекс методических и программных средств прогнозирования и автоматизированного управления шероховатостью обработанной поверхности путем изменения геометрии инструмента и кинематики.

8. Научное положение о существенном отличии процессов обработки резанием наружных и внутренних поверхностей (точение и растачивание), не позволяющем распространять закономерности одного процесса на другой. Растачивание закаленных сталей характеризуется иными условиями деформации срезаемого слоя, трения и теплообразования, более высокой степенью пластической деформации, большей степенью влияния износа на параметры стружкообразования и температуру. Эти отличия усиливаются с уменьшением диаметра растачиваемого отверстия.

9. Научное положение о полиэкстремальном характере зависимости стойкости нитридных инструментов от скорости резания как отражении изменений сложной природы взаимодействия их с закаленными сталями в различных скоростных диапазонах. Разработана такая аналитическая методика аппроксимации, которая впервые более полно отражает физическую сущность сложной зависимости стойкости инструмента от скорости резания. В отличие от известных в научной литературе зависимостей, предложенная описывает полиэкстремальную структуру стойкостной зависимости, причем место положения максимумов и минимумов (и по оси  $T$  и по оси  $v$ ) зависит от факторов резания: подачи, глубины и диаметра обработки. В то же время преобразование уравнения  $T=f(v)$  в уравнение  $L=f(v)$  позволяет получить одноэкстремальную зависимость для длины пути резания.

10. Впервые методика многопараметрических отображений аффинного пространства приложена к исследованию геометро-кинематических условий периодического резания. Показано, что полигонные поверхности - это частный случай периодических поверхностей кинематического происхождения.

Получено не имеющее аналогов математическое описание поверхностей резания, скорости резания, траекторий точек режущей кромки и их длин, действительных геометрических параметров для лезвийной обработки периодических поверхностей, имеющих структуру двух вращений.

11. Выявлены физические предпосылки применения инструмента из сверхтвердых нитридов бора в условиях периодического резания, при котором непрерывность снятия срезаемого слоя сочетается с циклическим изменением условий процесса. На примере растачивания полигонных поверхностей показан периодический характер изменения и интервалы колебаний скорости резания, кинематических углов и, как следствие, сил и мощности резания, условий формирования шероховатости обработанной поверхности. Получены новые математические зависимости, отражающие взаимосвязь указанных параметров с параметрами режима резания.

12. Доказана принципиальная возможность формирования в процессе лезвийной обработки инструментами из сверхтвердых нитридов бора такого состояния поверхности и поверхностного слоя закаленных сталей, когда

параметры шероховатости, микротвердости и остаточные напряжения обеспечивают более высокие эксплуатационные свойства изделия, чем после обработки шлифованием.

13. Предложена методология оптимизации процесса резания закаленных сталей инструментами из сверхтвердых нитридов бора, базирующаяся на установлении физических закономерностей процесса в широком диапазоне условий, включая их периодические изменения; создании математической модели - представляющей собой систему уравнений, адекватно описывающих различные стороны процесса резания; процедуры определения оптимальных выходных параметров по одному из трех рассмотренных методов.

14. Научно обоснованы практические рекомендации по эффективной обработке закаленных сталей инструментами из сверхтвердых нитридов бора.

#### Практическая ценность и реализация результатов работы

- Главным практическим результатом выполненных исследований является создание предпосылок повышения эффективности обработки закаленных сталей и расширения областей применения инструментов из сверхтвердых нитридов бора, включая обработку наружных и внутренних поверхностей сложной формы.
- Создана автоматизированная система выбора оптимальных параметров обработки и разработано программное обеспечение для определения технологических параметров.
- Разработан и запатентован стандарт на лезвийный инструмент из ПСТМ.
- Предложена технология изготовления лезвийных инструментов. Разработано специальное устройство для управления рабочей поверхностью шлифовальных кругов и выявлены принципы усовершенствования электроалмазных станков (типа WENDT) с приданием им функций многоцелевого назначения, в том числе возможности электроэрозионного и электрохимического управления рельефом кругов. Принцип устройства запатентован.
- Определена новая область эффективного применения композита 10. Доказана возможность и целесообразность его применения в усложненных условиях растачивания периодических поверхностей в деталях из закаленной стали. Несмотря на циклический характер нагружения и усталостные явления, растачивание успешно заменяет внутреннее шлифование.
- Разработаны рекомендации для расширения общемашиностроительных нормативов режимов резания данными об обработке инструментами из сверхтвердых материалов.

• Результаты исследований используются в странах СНГ и Венгрии на предприятиях, производящих и применяющих инструменты из сверхтвердых нитридов бора, а также в научных исследованиях и учебном процессе при обучении студентов и докторантов на кафедрах "Резание материалов и режущие инструменты" Харьковского государственного политехнического университета и "Технология машиностроения" Мишкольцкого университета.

**Апробация работы.** Основные положения и диссертационная работа в целом докладывались на научных семинарах кафедры "Технология машиностроения" Будапештского технического университета, кафедры "Резание материалов и режущие инструменты" Харьковского государственного политехнического университета, кафедры "Технология машиностроения" Мишкольцкого университета, а также на международных научно-технических конференциях и семинарах:

"Шлифование" (II. Bratislava '89; III. Zlín '91); Zeszyty Naukowe, Wydziału Mechanicznego 11., Koszalin 1989; TECHNOLOGY'92, Kosice; Technologia obrabiania w automatyzowanej stolarskiej wyrobie, Kosice 1993; По инструменту и инструментальным материалам, Мишкольц (1989; 1993); microCAD-SYSTEM, Miskolc ('91; '92; '94; '95); microCAD-SYSTEM, Харьков ('93; '94; '95); Eleventh International Conference on Ion Beam Analysis, Balatonfüred 1993; Modern Machines and Technologies, MTM, Cugir ('93; '95); 2nd International Techno-Scientific Conference on Influence of Production Engineering on State of the Surface Layer, SL '93 Gorzow; Results of the Scientific Cooperation between the Polytechnical University of Kharkov and University of Miskolc, Miskolc 1994; Proceedings of the joint Hungarian-British International Mechatronics Conference, Budapest 1994; Intersymposium Badania narzedzi, Krakow 1988; Высокие технологии в машиностроении, Харьков-Алушта 1991; INTERPARTNER, Алушта ('92; '94; '95); IV. International Symposium OSN'92, Krakow; International DAAAM Symposium (2nd Czechoslovakia 1991; 3rd Budapest 1992; 5th Maribor 1994; 6th Krakow 1995); MECHATRONINFO (Kecskemét-90; Budapest-92); "Конструкторы" (Miskolc, VIII-1991; IX-1994; X-1995)

**Публикации.** По материалам диссертации опубликовано 93 работы, из них 39 без соавторов, 50 за пределами Венгрии, в том числе одна монография, 2 патента.

**Структура и объем работы.** Диссертационная работа состоит из введения, 7 глав, заключения, списка литературы, включающего 328 источников, и приложения. Содержит 368 страниц машинописного текста, 149 рисунок, 16 таблиц.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Обзор работ, раскрывающих современное состояние вопроса и перспективы применения поликристаллических сверхтвердых материалов на основе нитрида бора, показывает, что это направление стало очень важным в развитии металлообработки. Применение инструментов из ПСТМ позволяет повысить производительность и культуру труда, улучшить качество изготовления деталей, решить проблему резания ряда труднообрабатываемых материалов, а также найти новые технологические решения в материалообработке.

В разработку этой проблемы важный вклад внесли Верещагин Л.Ф., Францевич И.Н., Семко М.Ф., Новиков Н.В., Трефилов В.И., Бочко А.В., Карюк Г.Г., Лысанов В. С., Боровский В.Г., Богородский Е.С., Коломиец В.В., Романов В.Ф., Зубарь В.П., Крюков В.К., Дрожжин В.И., Грабченко А.И., Гавлик Й., Гриценко Э.И., Кавалец М., Кениг В., Лиерат Ф., Грай К., Хорват М., Муковоз Ю. А., Кравченко Б. А., Курдюмов В. А. и др.

Как показывает имеющийся опыт, большую трудность представляет изготовление точных поверхностей деталей из закаленных сталей, в том числе внутренних и сложных поверхностей. Серьезную проблему представляет финишная обработка деталей многогранного (полигонного) профиля, сопровождающаяся периодически изменяющимися условиями резания, однако в литературе отсутствуют сведения по лезвийной обработке таких деталей из закаленных сталей, что сдерживает применение сложно-профильных соединений в технике.

Анализ состояния вопроса об их использовании показал, что физическая сторона явлений, сопровождающих процесс резания закаленных сталей, вскрыта в недостаточной степени. В полной мере это относится и к процессу растачивания инструментом из ПСТМ, который не занял достойного места в арсенале материалообработки. Ощущается острая потребность в разработке систем автоматического определения оптимальных параметров обработки.

Поэтому поиск основных физических и технологических закономерностей лезвийной обработки закаленных сталей и создания технологий на базе применения такого инструмента велся на широкой комплексной основе, отраженной в структурно-логической схеме работы (рис. 1).

На основании изложенного в диссертации решались следующие задачи :

1. Получение первичной и обобщение имеющейся информации о физической сущности процессов обработки материалов, имеющих высокую твердость, инструментами из ПСТМ; установление физических и технологических закономерностей процесса резания при растачивании внутренних поверхностей как исходной базы создания методологии оптимизации этих процессов.



Рис. 1 - Структурно-логическая схема

2. Установление взаимосвязи между основными характеристиками процесса резания в широком диапазоне изменения параметров обработки.

3. Сопоставление работоспособности резцов из различных сверхтвердых инструментальных материалов с целью получения наиболее общей формы стойкостных зависимостей.

4. Разработка теоретических основ управления шероховатостью обработанной поверхности и экспериментальное определение ее параметров, изучения состояния поверхностного слоя деталей после различных методов финишной обработки для выявления наиболее приоритетного из них.

5. Совершенствование технологии изготовления инструмента из ПСТМ, разработка системы режущих пластин и резцов из ПСТМ в соответствии с ISO.

6. Оценка технологических возможностей инструмента из ПСТМ и исследование закономерностей процесса растачивания в условиях неравномерного резания.

7. Создание математической модели и методологии оптимизации процессов, разработка рекомендаций с целью повышения эффективности лезвийной обработки закаленных сталей.

• **Исследование процесса стружкообразования, сил резания и тепловых явлений**

Большинство явлений, сопровождающих процесс резания, взаимосвязаны, поэтому понять их природу и закономерности изменения в зависимости от условий обработки без комплексного подхода невозможно. В работе изучались деформация срезаемого слоя, силы резания, площадь контакта стружки с инструментом, коэффициенты трения на поверхностях инструмента и температура резания.

• Особые физико-механические свойства ПСТМ, резание, как правило, с небольшими толщинами среза, наличие отрицательных передних углов режущего клина инструмента – все это обуславливает различие процесса стружкообразования при точении и растачивании. Исследование контактных процессов позволило установить наличие налипов на передней поверхности, характер и степень влияния скорости и удельного давления на коэффициент трения. Износ резца, скорость, глубина резания и диаметр растачивания по-разному влияют на деформацию срезаемого слоя.

Выявлены три характерных диапазона влияния скорости резания на усадку стружки: до границы первого и второго диапазонов ( $v_{12}$ ) коэффициент утолщения стружки растет, до границы второго и третьего ( $v_{23}$ ) с ростом скорости - круто падает, а в третьем диапазоне, при больших скоростях резания - убывает монотонно. Его падение при  $v > v_{12}$  объясняется изменением коэффициента трения между стружкой и передней поверхностью с ростом температуры.

Значительную роль в изменении коэффициента утолщения стружки играет налип. Так, с ростом скорости резания до  $v_{23}$  увеличивается до максимальных значений действительный передний угол инструмента, степень деформации срезаемого слоя уменьшается, коэффициент утолщения стружки достигает минимума. При  $v > v_{23}$  налип исчезает и скорость резания влияет на коэффициент утолщения стружки через тепловой фактор.

Увеличение подачи снижает коэффициент утолщения стружки, так как при увеличении толщины срезаемого слоя и температуры на контактных поверхностях инструмента уменьшается коэффициент трения.

Влияние глубины резания объясняется ростом ширины среза и более тяжелыми условиями стружкообразования, изменяющими контактные процессы и несколько повышающими коэффициент утолщения стружки.

С уменьшением диаметра растачивания увеличивается усадка стружки только в диапазоне малых скоростей резания, когда решающую роль приобретает геометрический фактор. С уменьшением радиуса растачивания уменьшается угол скалывания, увеличиваются радиальная сила, удельная работа и коэффициент деформации; максимум в зависимостях  $k=f(v)$  не только увеличивается, но и смещается в сторону меньших скоростей резания, т.е. высокие температуры достигаются при меньших их значениях. Теплопроводность композита также влияет на положение экстремумов.

Влияние скорости резания на характеристики стружкообразования - коэффициент утолщения стружки  $K_a$ , угол сдвига  $\beta$ , относительный сдвиг  $\epsilon$ , длину пластического контакта  $C_1$  - с экстремальными значениями кривых показано на рис. 2.

С увеличением скорости резания качественное изменение основных характеристик процесса стружкообразования одинаковое. С ростом скорости до  $v_{23}$  увеличивается усадка стружки, относительный сдвиг, длина пластического контакта, уменьшается угол сдвига, а степень деформации стружки возрастает. Дальнейшее увеличение скоростей от  $v_{12}$  до  $v_{23}$  резко, от  $v_{23}$  - в меньшей мере уменьшает усадку стружки, относительный сдвиг и длину пластического контакта, повышая угол и снижая деформацию.

Установлено, что, как следует из теоретического анализа модели точения и растачивания, деформация срезаемого слоя при растачивании выше, чем при точении. Выявлены три характерные зоны влияния скорости резания на усадку стружки: в первой - при малых скоростях резания усадка стружки возрастает, во второй - с ростом скорости сильно падает, а в третьей - при больших скоростях резания, уменьшается незначительно. Граница первой и второй зон соответствует максимальному значению усадки. Местоположение экстремума с увеличением подачи, глубины резания и уменьшением диаметра обработки смещается в сторону меньших скоростей резания.

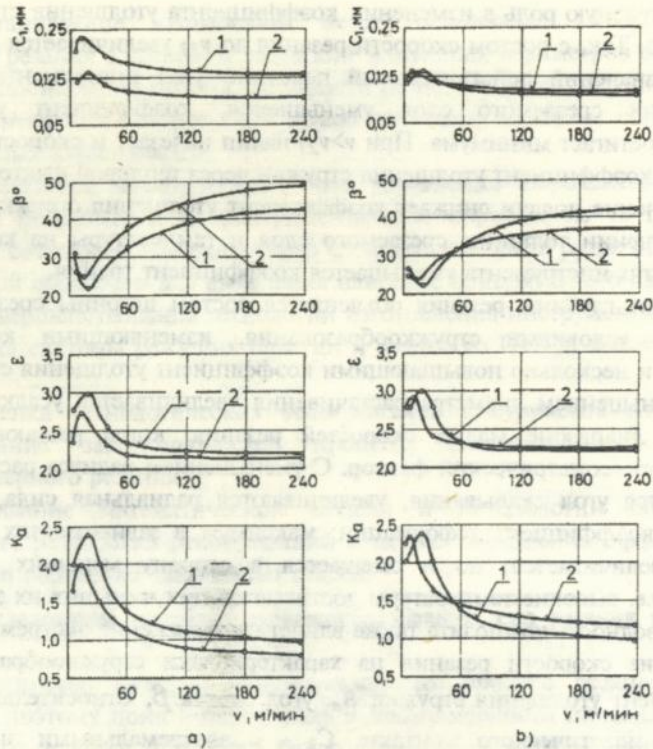


Рис. 2 - Влияние режимов резания на характеристики стружкообразования

а: 1.  $s=0,05$  мм/об; 2.  $s=0,1$  мм/об б: 1.  $t=0,1$  мм; 2.  $t=0,2$  мм  
(композит 10;  $s=0,05$  мм/об;  $t=0,1$  мм;  $h_3=0,4$  мм;  $\varnothing 45$  мм)

• Исследованы закономерности изменения сил резания от режимов обработки. Установлено большое влияние на силы резания диаметра обработки и износа режущего инструмента. Показано, что при растачивании радиальная составляющая силы резания превалирует над остальными, причем с износом инструмента это превышение увеличивается. Установлено влияние диаметра растачивания на силы резания, проявляющееся неодинаково в разных скоростных диапазонах, а также влияние  $v$ ,  $s$ ,  $t$ ,  $h_3$  и  $D$  на температуру в зоне резания, величина которой повышается с увеличением  $h_3$ ,  $v$  и с уменьшением  $D$ , влияние  $s$  и  $t$  проявляются в меньшей степени.

Зависимость составляющих силы резания от скорости резания имеет экстремальный характер. В первом диапазоне возрастание  $v$  до  $v_{12}$  интенсивно увеличивает силы резания, во втором - увеличение  $v$  до  $v_{23}$  снижает их, в третьем - увеличение  $v$  не изменяет силы резания.

• Процесс растачивания, имея существенные различия с процессом точения, предопределяет особенности тепловых явлений.

Высокие режущие свойства резцов на основе нитрида бора реализуются и сохраняются при высоких значениях температуры. Измерение температуры осуществлялось методом искусственной термопары, встроенной в резец, с дальнейшей экстраполяцией полученных результатов на главную режущую кромку, которая формирует зону резания; построено температурное поле реза (рис. 3).

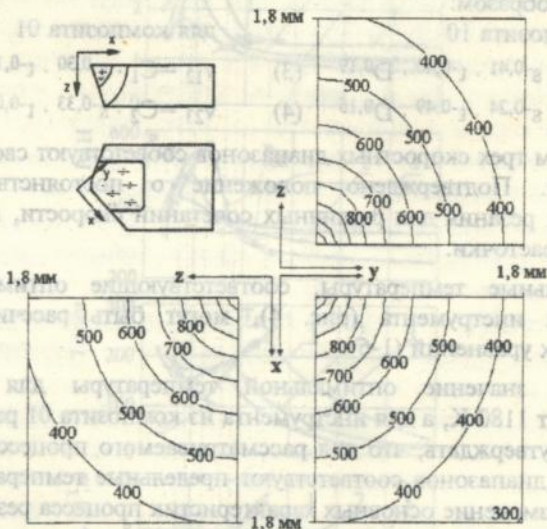


Рис. 3 - Температурное поле реза из композита 10

С повышением скорости вследствие увеличения работы резания и количества выделяющегося тепла растет температура, но ее рост отстает от роста скорости резания. Это отставание усиливается в зоне высоких скоростей. На кривой  $\theta=f(v)$  можно выделить три характерных интервала.

В первом при низких скоростях резания образуется стружка скалывания, длина контакта которой с передней поверхностью невелика. Но на задней поверхности с ростом коэффициента трения температура интенсивно увеличивается. Во втором диапазоне скоростей резания обрабатываемый материал размячается, коэффициент трения снижается, интенсивность роста температуры уменьшается. При больших скоростях резания образуется сливная стружка, интенсивность роста температуры незначительна, что объясняется уменьшением коэффициента трения, силы резания, снижением пластической деформации стружки и резким увеличением теплоотвода в окружающую среду.

Получены обобщенные температурные зависимости при растачивании деталей из ШХ15 резцами из композита 01:

$$\Theta = 695,5 \cdot v^{0,2264} \cdot s^{0,0833} \cdot t^{0,0254} \cdot D^{-0,0742} \cdot h_3^{0,2089} \quad (1)$$

и резами из композита 10

$$\Theta = 1098,5 \cdot v^{0,2002} \cdot s^{0,1013} \cdot t^{0,1013} \cdot D^{-0,0594} \cdot h_3^{0,2405} \quad (2)$$

Сопоставление кривых усадки стружки, сил резания, длины пути резания с температурными закономерностями указывает на постоянство последней в области максимумов для различных значений подачи и диаметров растачиваемого отверстия (рис. 4).

Положение экстремума при разных значениях  $s$ ,  $t$ ,  $D$  характеризуется следующим образом:

для композита 10

$$v_{12} = C_1 \cdot s^{-0,41} \cdot t^{-0,40} \cdot D^{0,19} \quad (3)$$

$$v_{23} = C_2 \cdot s^{-0,24} \cdot t^{-0,49} \cdot D^{0,16} \quad (4)$$

для композита 01

$$v_{12} = C_1 \cdot s^{-0,30} \cdot t^{-0,11} \cdot D^{0,23} \quad (5)$$

$$v_{23} = C_2 \cdot s^{-0,33} \cdot t^{-0,08} \cdot D^{0,34} \quad (6)$$

Границам трех скоростных диапазонов соответствуют свои определенные температуры. Подтверждено положение о постоянстве оптимальной температуры резания для различных сочетаний скорости, подачи, глубины и диаметра расточки.

Оптимальные температуры, соответствующие оптимальной работоспособности инструмента (рис. 4), могут быть рассчитаны из выше приведенных уравнений (1-6).

Среднее значение оптимальной температуры для композита 10 соответствует 1180 К, а для инструмента из композита 01 равно 1318 К.

Можно утверждать, что для рассматриваемого процесса границам трех скоростных диапазонов соответствуют предельные температуры, предопределяющие изменение основных характеристик процесса резания (рис. 4).

### • Исследование работоспособности инструмента

• Изучению износа и стойкости инструмента при резании закаленных сталей предшествовала разработка системы резцов из ПСТМ с унифицированными присоединительными элементами. Она обеспечивает возможность наиболее эффективной обработки поверхностей любой формы и обладает теми же достоинствами, что и существующие инструментальные системы. Была решена задача оптимального раскроя поликристалла при изготовлении режущих пластин всех требуемых форм.

Разработанная система применима для всех видов лезвийной обработки, обеспечивает необходимые параметры качества, возможность использования любых пластин - треугольных, квадратных, ромбических, а также напайных, соответствующих стандарту ISO.

Работы по совершенствованию технологии производства инструментов из ПСТМ финансировались Государственным комитетом технического прогресса (ОМФВ) Венгерской республики.

• Для непрерывного контроля износа режущих инструментов и их постоянного наблюдения в ходе обработки деталей используются новые возможно-

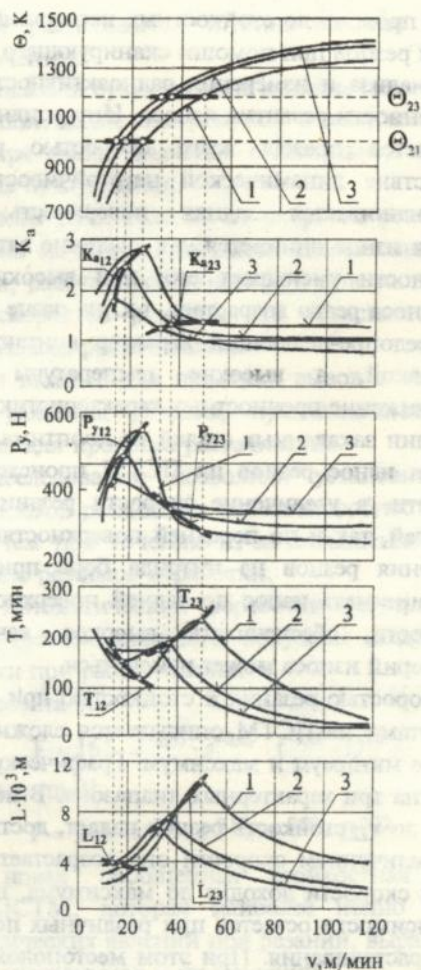


Рис. 4 - Взаимосвязь температуры резания с основными характеристиками процесса растачивания

1.  $s=0,025$  мм/об; 2.  $s=0,075$  мм/об; 3.  $s=0,125$  мм/об  
(композит 10;  $t=0,1$  мм;  $\varnothing 45$  мм;  $h_3=0,4$  мм)

сти, открываемые ядерными методами и компьютерной техникой. На изохронном циклотроне АТОМКИ в Дебрецене пластины из алмазных поликристаллов активированы на базе реакции  $^{56}\text{Fe}(p, n) ^{56}\text{Co}$  ( $T_{1/2}=71,1$  дней)  $E_p=8,0$  MeV, а из сверхтвердых нитридов бора -  $^{10}\text{B}(p, \alpha) ^7\text{Be}$  ( $T_{1/2}=53$  дня)  $E_p=5,4$  MeV. Данный метод характеризуется малой радиоактивностью исследуемого инструмента и большой точностью измерения износа.

• Установлены природа, особенности и основные закономерности износа резцов на основе нитрида бора при растачивании стали ПХЛ5.

Комплексное проведение стойкостных испытаний, изучения изношенных поверхностей резцов при помощи сканирующего микроскопа и рентгеновского микроанализа и измерения радиоактивности позволили вскрыть физические особенности развития износа. Интенсивность износа резцов из ПСТМ определяется прежде всего скоростью резания: при малых скоростях, вследствие динамической неустойчивости процесса резания, интенсивно из-нашивается задняя поверхность; при оптимальных скоростях резания износ снижается, т.к. наличие заторможенного слоя на передней поверхности уменьшает его; при высоких скоростях резания интенсивность износа резко возрастает, т.к. на резце отсутствует защитный слой металла, предопределяющий характер контактного взаимодействия резца с заготовкой, а высокие температуры вызывают фазовые превращения и снижение прочностных характеристик ПСТМ.

- При растачивании закаленных сталей на дооптимальных и оптимальных скоростях резания износ резцов из ПСТМ происходит, в основном, по задней поверхности, а увеличение скорости резания приводит к износу резца как по задней, так и по передней поверхностям, поэтому в качестве критерия затупления резцов из нитрида бора при растачивании стали ШХ15 следует принимать износ по задней поверхности не более 0,4 мм. При необходимости обеспечивать высокое качество обработанной поверхности критерий износа может изменяться.

- Связь между скоростью резания и стойкостью при обработке закаленных сталей инструментами из ПСТМ описывается сложной кривой, имеющей четко выраженные минимум и максимум. Графическую зависимость  $T=f(v)$  можно разделить на три характерных диапазона. В первом - с увеличением скорости резания до  $v_{12}$  стойкость резцов падает, достигая минимума, затем с дальнейшим увеличением скорости она возрастает (второй диапазон) и при оптимальной скорости доходит до максимума, после чего падает. Такой характер зависимости остается при различных подачах, глубинах резания и диаметрах растачивания. При этом местоположение локального минимума или максимума изменяется в зависимости от параметров режимов обработки.

Зависимости длины пути резания от скорости резания  $L=f(v)$  для резцов из композита 01 и композита 10 указывают на низкую работоспособность инструмента при малых (до  $v_{12}$ ) скоростях обработки. Наивысшая работоспособность резцов из композитов обеспечивается в сравнительно узком интервале скоростей резания. Максимальные значения длины пути резания в зависимости  $L=f(v)$  для композитов 01 и 10 соответствуют разным скоростям резания. Смещение оптимумов у этих материалов можно объяснить их различными теплофизическими характеристиками. Подача оказывает большее влияние на работоспособность резцов из композита 01 чем из

композита 10. При растачивании глубина резания оказывает большее влияние, чем при точении.

Исследования показали существенное влияние диаметра растачиваемого отверстия на местоположение экстремумов в зависимости  $L=f(v)$ . Так, с увеличением диаметра растет значение оптимальной скорости резания и максимальной длины пути резания.

Зависимости длины пути резания от скорости резания для точения и растачивания резцами из композита имеют одинаковый характер. Однако максимум стойкости, работоспособности ( $v_{23}$ ) при растачивании смещен в сторону меньших скоростей резания, что объясняется большей теплонапряженностью процесса растачивания.

Отсюда вытекает важный для практики вывод о том, что применение рекомендаций по режимам резания, предназначенных для процессов точения, не пригодно для процесса растачивания.

Проведенные исследования позволили установить более высокую степень влияния режимов резания на работоспособность резцов из ПСТМ при растачивании, чем при точении из-за повышенной чувствительности процесса к изменению режимов обработки.

На основании математической обработки результатов исследований стойкости резцов в третьем диапазоне получены следующие зависимости для расчета стойкости при растачивании:

резцами из композита 10

$$T = 161 \cdot v^{-2,03} \cdot s^{-0,69} \cdot t^{-1,09} \cdot D^{0,8}$$

резцами из композита 01

$$T = 941 \cdot v^{-2,0} \cdot s^{-0,87} \cdot t^{-0,29} \cdot D^{0,72}$$

• Предложена новая обобщенная стойкостная зависимость для инструментов из ПСТМ, которая наиболее полно и точно отражает закономерности физических явлений при резании, выраженные в описании точного положения экстремумов и их значений.

$$T = \frac{C_{T1}}{v^3 + C_{T2} \cdot v^2 + C_{T3} \cdot v}$$

где  $C_{T1}$ ,  $C_{T2}$ ,  $C_{T3}$  зависят от условий резания, и определяются формулами

$$C_{T2} = -\frac{3}{2} \cdot (v_{12} + v_{23}), \quad C_{T3} = 3 \cdot v_{12} \cdot v_{23}, \quad C_{T1} = T_{23} \cdot (v_{23}^3 + C_{T2} \cdot v_{23}^2 + C_{T3} \cdot v_{23})$$

Разработана такая аналитическая форма аппроксимации, которая впервые более полно отражает физическую сущность сложной зависимости стойкости инструмента от скорости резания (рис. 5).

Сформулировано научное положение о полиэкстремальной зависимости стойкости нитридных инструментов как отражении изменений сложной природы взаимодействия их с закаленными сталями в различных скоростных диапазонах.

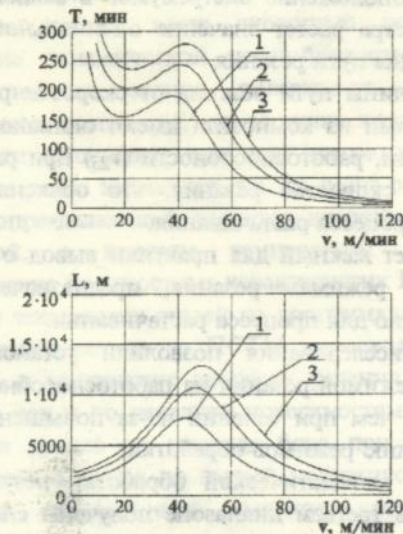


Рис. 5 - Зависимости  $T(v)$  и  $L(v)$  при различных значениях диаметров

1.  $\varnothing 45$ ; 2.  $\varnothing 75$ ; 3.  $\varnothing 100$  [мм] ( $s=0,025$  мм/об;  $t=0,1$  мм; композит 10)

В отличие от известных в научной литературе зависимостей предложенная формула описывает полиэкстремальную структуру стойкостной зависимости, причем место положения максимумов и минимумов (и по оси  $T$  и по оси  $v$ ) зависит от факторов резания: подачи, глубины и диаметра обработки.

В то же время, преобразование уравнения  $T=f(v)$  в уравнение  $L=f(v)$  позволяет получить одноэкстремальную зависимость для длины пути резания.

### • Качество обработанной поверхности

• Для решения задач аналитического расчета и прогнозирования параметров шероховатости поверхностей, обработанных резцами из ПСТМ, создана геометро-кинематическая модель формирования микрорельефа поверхности. Такая модель включает в себя следующие теоретические и методические разработки и программные средства:

1. Обобщенную математическую модель режущей кромки, вбирающей в себя формы кромок любых конфигурации (рис. 6), имеющей вид линии, состоящей из отрезков прямых и окружностей и заданной функцией:

$$L = F(l, l', l'', h_1, h_1', h_1'') \quad (1)$$

где  $l, l', l'', h_1, h_1', h_1''$  - составляющие обобщенной режущей кромки.

Путем конкретизации уравнений составляющих режущих кромок уравнение обобщенной режущей кромки получено в виде составной функции вида  $y=f(x)$ .

2. Геометро-кинематическую схему формирования профиля микронеровностей, в основу которой положено два варианта:

а) профиль микронеровностей формируется как часть плоскости, заключенной между осью  $x$ , внешней границей слоя снимаемого материала, вспомогательной кромкой в положении II резца и главной кромкой в положении I резца;

б) профиль микронеровностей ограничен осью  $x$ , вспомогательной кромкой в положении II резца и главной кромкой в положении I резца. (Позиции I и II соответствуют последовательным положениям резца при движении по направлению подачи.)

3. Общий алгоритм определения параметров шероховатости  $R_{max}, R_z, R_a, t_p$ .

4. Пакеты расчетных и графических программ, реализующих алгоритм и графический контроль расчетов.

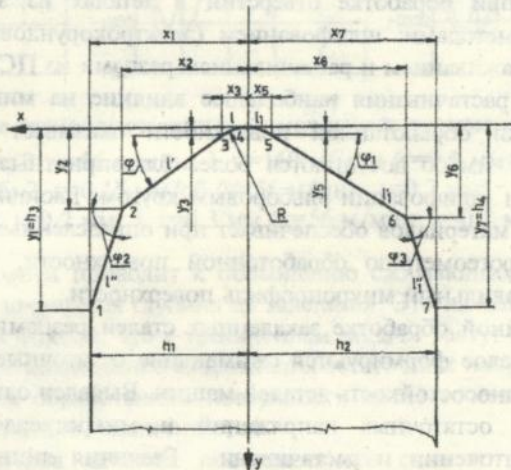


Рис. 6 - Обобщенная режущая кромка

Получены корреляционные зависимости между расчетными значениями параметров шероховатости и их фактическими значениями, которые позволяют путем расчета определить параметры шероховатости при обработке резцами из ПСТМ.

● Особенности стружкообразования, обусловленные низким коэффициентом трения и большим углом сдвига, большими давлениями и высокой температурой в зоне резания, локальность и кратковременность воздействия которой на обработанную поверхность, ее проникновение на нез-

начительную глубину оказывают влияние на шероховатость обработанной поверхности, ее наклеп, уровень и знак остаточных напряжений.

Установлено, что лезвийная обработка деталей из закаленных сталей резцами из нитрида бора обеспечивает высокое качество обработанной поверхности по параметрам шероховатости. Показано отличие процесса точения и растачивания, которое определяется особенностями стружкообразования и контактных процессов.

Установлены три основных диапазона скоростей резания, которые обеспечивают различные значения шероховатости и дан их анализ. Наиболее благоприятный диапазон - третий.

На основании математической обработки результатов исследований могут быть рассчитаны параметры шероховатости для резцов из композита 10

$$R_a = 71,2 \cdot v^{-0,37} \cdot s^{0,58} \cdot t^{-0,11} \cdot D^{-0,27} \cdot h_3^{0,20}$$

для резцов из композита 01

$$R_a = 3,41 \cdot v^{-0,12} \cdot s^{0,20} \cdot t^{-0,12} \cdot h_3^{0,19}$$

• В работе рассматривались микрогеометрические характеристики, полученные при обработке отверстий в деталях из закаленных сталей различными методами: шлифованием (электрокорундовым и эльборовым кругом), выплаживанием и растачиванием резцами из ПСТМ.

В случае растачивания наибольшее влияние на микрогеометрические характеристики обработанной поверхности оказывает подача  $s$ : при  $s$  меньше 0,075 мм/об достигаются более благоприятные значения  $R_a$ ,  $R_z$ ,  $R_{max}$ , чем при шлифовании эльборовым кругом. Растачивание резцами из сверхтвердых материалов обеспечивает при определенных режимах резания лучшую микрогеометрию обработанной поверхности, чем шлифование, дает более правильный микропрофиль поверхности.

• При лезвийной обработке закаленных сталей резцами из ПСТМ в поверхностном слое формируются сжимающие остаточные напряжения, повышающие износостойкость деталей машин. Выявлен одинаковый характер зависимостей остаточных напряжений и микротвердости от режимов резания при точении и растачивании. Различия лишь количественные: большее влияние глубины резания, повышенный уровень сжимающих напряжений и меньшая глубина их залегания при растачивании.

Установлено, что при растачивании резцами на основе нитрида бора закаленной стали максимальные сжимающие напряжения выше и локализуются ближе к поверхности детали из-за силовых и температурных особенностей обработки.

Решающее влияние на остаточные напряжения при растачивании оказывает силовой фактор, формирующий их сжимающий характер. Высокая температура, возникающая при резании, действует кратко-

временно и, проникая на незначительную глубину, не вызывает существенных фазовых превращений в поверхностном слое.

Величина и знак остаточных напряжений зависят от скорости резания, подачи, геометрии резца и других условий, влияние которых проявляется в изменении роли силового и температурного факторов. Превалирующее действие первого приводит к возникновению в поверхностных слоях сжимающих остаточных напряжений, второго - растягивающих. Это подтверждается и при растачивании стали ШХ15 резцами из ПСТМ. На рис. 7 показаны эпюры тангенциальных остаточных напряжений по глубине залегания для различных режимов. Увеличение скорости резания приводит к снижению сжимающих остаточных напряжений, т.к. оно сопровождается повышением температуры в поверхностном слое.

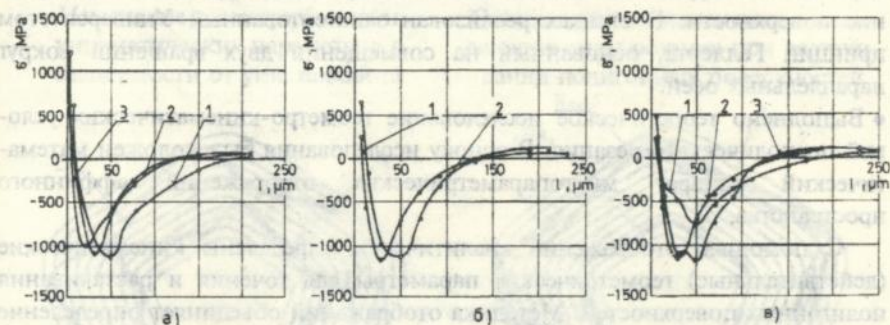


Рис. 7 - Влияние технологических режимов на остаточные напряжения

а: 1.  $v=81$  м/мин; 2.  $v=56$  м/мин; 3.  $v=160$  м/мин ( $s=0,1$  мм/об;  $t=0,2$  мм)

б: 1.  $s=0,1$  мм/об; 2.  $s=0,15$  мм/об ( $v=56$  м/мин;  $t=0,2$  мм)

в: 1.  $t=0,1$  мм; 2.  $t=0,2$  мм; 3.  $t=0,3$  мм ( $v=56$  м/мин;  $s=0,1$  мм/об)

Увеличение подачи приводит к повышению сжимающих напряжений, одновременно увеличивается глубина их залегания. Это находится в полном соответствии с тем фактом, что с увеличением подачи растут силы резания, ответственные за возникновение сжимающих остаточных напряжений.

Микротвердость обработанной поверхности после точения резцами из композитов, как правило, увеличивается.

Анализ параметров качества поверхностного слоя и шероховатости поверхности, обработанной растачиванием, позволил сделать вывод о возможности, а в ряде случаев - целесообразности замены операции внутреннего шлифования растачиванием отверстий в закаленных сталях резцами из композита 01 и композита 10.

Найденные закономерности качества обработанной поверхности и поверхностного слоя в зависимости от факторов резания при точении и растачивании закаленных сталей резцами из композитов позволяют целенаправленно влиять на процесс резания.

### • Резание при периодических нагрузках

Периодическими принято называть поверхности, профиль которых состоит из периодически повторяемых одинаковых участков. Детали с такими поверхностями широко применяются в машиностроении. Свойства периодичности особенно четко проявляются у полигонных (многогранных) поверхностей.

На кафедре "Технология машиностроения" Мишкольцкого Университета (Венгрия) под руководством профессора Л. Грибовски разработаны эффективная технология обработки полигонных деталей и универсальные токарные и шлифовальные станки, на которых с одной установки можно обрабатывать круглые и полигонные (многогранные) наружные и внутренние поверхности. В станках реализован запатентованный Университетом принцип Геллерта, основанный на совмещении двух вращений вокруг параллельных осей.

• Выполнено теоретическое исследование геометро-кинематических условий периодического резания. В основу исследования был положен математический аппарат многопараметрических отображений аффинного пространства.

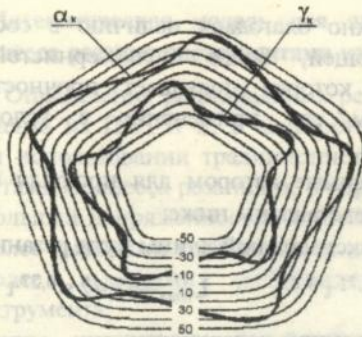
С помощью отображений аналитически определены кинематические (действительные) геометрические параметры для точения и растачивания полигонных поверхностей. Методика отображений объединяет определение этих параметров с разработанным ранее в Мишкольцком университете описанием полигонных поверхностей.

Получены формулы для кинематических и геометрических параметров, имеющие обобщенный характер. Они применимы для любой точки режущей кромки и любого момента времени при полигонном растачивании и точении.

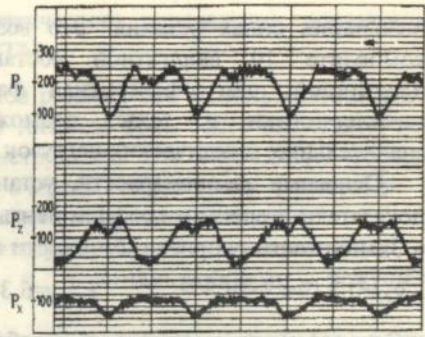
Кинематические и геометрические условия резания при растачивании на разных участках полигонного профиля существенно различаются. Это одна из важных особенностей растачивания полигонных отверстий. Полученные эпюры распределения кинематических углов и скорости резания по полигонному профилю (рис. 8) позволяют обоснованно назначать рациональные передний и задний статические углы и аргументированно объяснять различные стороны процесса резания.

• Доказано, что эффективная обработка полигонных отверстий закаленных сталей может осуществляться только резанием инструментом на основе твердого нитрида бора.

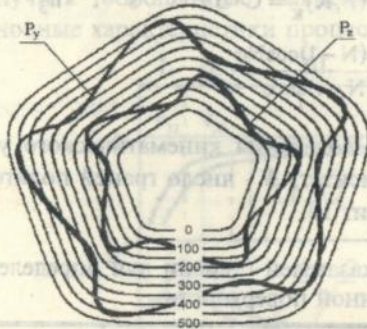
Установлено, что в зависимости от угла поворота полигонной поверхности значительно изменяются кинематические углы и скорость резания (рис. 8), вследствие чего происходит изменение равнодействующей силы резания (по величине и направлению) и шероховатости обработанной поверхности.



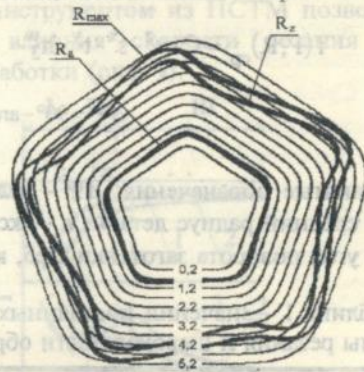
а) Изменение геометрических и кинематических параметров в зависимости от угла поворота



б) Осциллограмма изменения составляющих силы резания при растачивании полигональных поверхностей



в) Изменение составляющих силы резания



г) Шероховатость обработанной поверхности

Рис. 8 - Динамика характеристик обработки полигональных поверхностей

Большим циклическим нагрузкам, проявляющимся при обработке полигональных поверхностей, лучше противостоят резцы из композита 10, обеспечивающего высокую стойкость резца и наивысшую работоспособность.

Стойкость резца при скоростях выше оптимальных (для профиля Ge5):

$$T = 1976 \cdot v^{-1,94} \cdot s^{-0,22} \cdot t^{-1,14}$$

Несмотря на большие циклические нагрузки лезвийная обработка полигональных отверстий обеспечивает высокое качество обработанной поверхности, по уровню не уступающее абразивной обработке.

Таким образом, применением резцов из композита 10 при периодическом резании можно обеспечить достаточно большую длину пути резания и высокое качество обработанной поверхности при сравнительно

небольших силах резания. Это возможно благодаря наличию в составе композита 10 вюртитной составляющей, более мелкозернистой и пластичной, чем сфалеритная фаза, которая повышает прочностные характеристики и делает возможным его применение в условиях значительных циклических нагрузок.

**Основные закономерности**, установленные автором для профиля Ge5, показатели степени и коэффициенты представлены ниже:

- Зависимости скорости, стойкости и максимальной длины пути резания:

$$v_{23} = 12,19 \cdot s^{-0,26} \cdot t^{-0,05}; \quad T_{\max} = 6,37 \cdot s^{-0,71} \cdot t^{-1,05}; \quad L_{\max} = 65,42 \cdot s^{-0,27} \cdot t^{-1,1}$$

- Силы резания и шероховатость обработанной поверхности:

$$P_{(x,y,z)} = P_{(x,y,z)_{cp}} + P_{(x,y,z)_K}$$

$$R_{(a,z,max)} = R_{(a,z,max)_{cp}} + R_{(a,z,max)_K}$$

$$f(P,R)_{cp} = C \cdot v^z \cdot s^x \cdot t^y \cdot h_3^w \quad f(P,R)_K = C \cdot \Delta\Psi \cdot v^z \cdot s^x \cdot t^y \cdot h_3^w$$

$$\Delta\Psi = 90^\circ - \arctg \frac{h + e(N-1)\cos N\varphi}{e(N-1)\sin \varphi}$$

Принятые обозначения:  $\Delta\Psi$  - величина колебания кинематического угла;  $h$  - средний радиус детали;  $e$  - эксцентриситет;  $N$  - число граней полигона;  $\varphi$  - угол поворота заготовки Ge5, композит 10.

Таблица 1 - Значения постоянных и показателей степени для определения силы резания и шероховатости обработанной поверхности

	C	z	x	y	w
$P_{x_{cp}}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	-0,31	0,15	0,25	0,63
$P_{z_{cp}}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	-0,54	0,66	0,43	0,24
$P_{y_{cp}}$	$9,3 \cdot 10^{-3}$	-0,38	0,49	0,23	0,90
$P_{x_K}$	1,65	0,02	0,07	0,23	0,47
$P_{z_K}$	-43,09	-0,19	0,12	0,46	0,22
$P_{y_K}$	93,59	0,01	0,59	0,13	0,71
$R_{a_{cp}}$	0,58	0,01	-0,05	0,02	-0,12
$R_{z_{cp}}$	3,27	-0,03	0,03	-0,16	0,01
$R_{max_{cp}}$	3,54	0,01	0,01	-0,08	-0,05
$R_{a_K}$	$0,76 \cdot 10^{-2}$	-0,67	0,05	-0,29	-0,43
$R_{z_K}$	$1,58 \cdot 10^{-2}$	-0,40	-0,08	-0,70	0,23
$R_{max_K}$	$1,20 \cdot 10^{-2}$	-0,61	-0,1	-0,45	0,58

● **Математическая модель для автоматического определения показателей процесса резания инструментами из ПСТМ**

Определение рациональных режимов резания при использовании инструмента из ПСТМ и, в частности, из нитрида бора более актуально, чем при использовании традиционного инструмента. Это объясняется особенностями процесса резания и, в первую очередь, следующими факторами:

- большей напряженностью и интенсивностью процесса резания;
- более высокими требованиями к качеству обработанной поверхности;
- более высокими требованиями к работоспособности режущего инструмента;
- узким интервалом скоростей резания, в котором наиболее полно реализуются преимущества инструмента из ПСТМ;
- высокая стоимость инструмента из ПСТМ.

Проведенный комплекс исследований по изучению физических особенностей процесса растачивания инструментом из ПСТМ позволил получить обобщенные зависимости влияния скорости резания на основные характеристики процесса обработки (рис. 9).

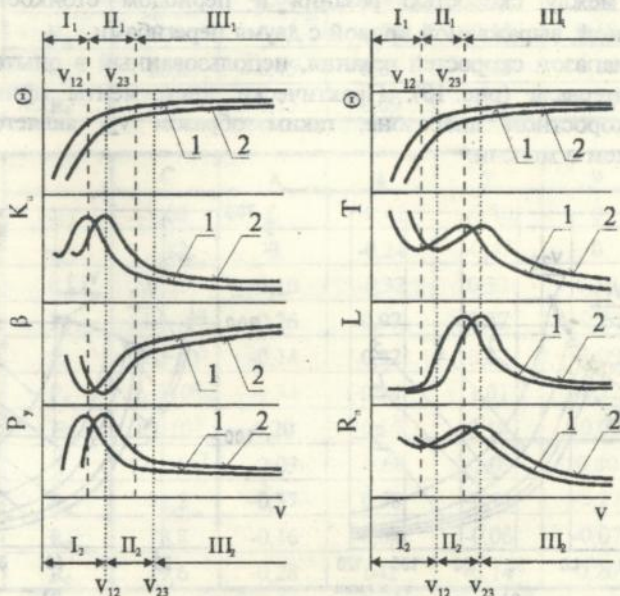


Рис. 9 - Обобщенная графическая интерпретация взаимосвязи основных характеристик резания при растачивании

Изучение физических закономерностей процесса резания и его особенностей, обобщение полученной и имевшейся информации позволило создать методологическую основу технологической информационной системы для применения инструментов на основе нитрида бора.

Создание информационной системы включило в себя:

- описание особенностей и закономерностей процесса резания инструментами из ПСТМ;
- выявление зависимостей, связывающих характеристики процесса резания с технологическими режимами;
- создание математической модели процесса резания на основе описательных зависимостей, используемых в теории резания;
- определение оптимальных технологических режимов.

• Накопление данных происходило в банках с использованием математических моделей. Составляющими математических моделей являлись описательные уравнения, ограничивающие факторы и целевые функции.

Среди описательных уравнений самые важные - стойкостные функции, уравнения силы и формулы шероховатости. Кроме них используются зависимости износа и точности. Хотя описательные уравнения, касающиеся сверхтвердых инструментов, известны, но постоянные, показатели степени и поправочные коэффициенты формул определены с недостаточной точностью и не могут быть приняты для практического использования.

Связь между скоростью резания и периодом стойкости является немонотонной, выражаемой кривой с двумя перегибами.

Весь диапазон скоростей резания, использованный в опытах, разделен на три интервала (рис. 10). Практически инструменты применяются в третьем скоростном диапазоне, таким образом  $v_{23}$  является нижним ограничением в модели.

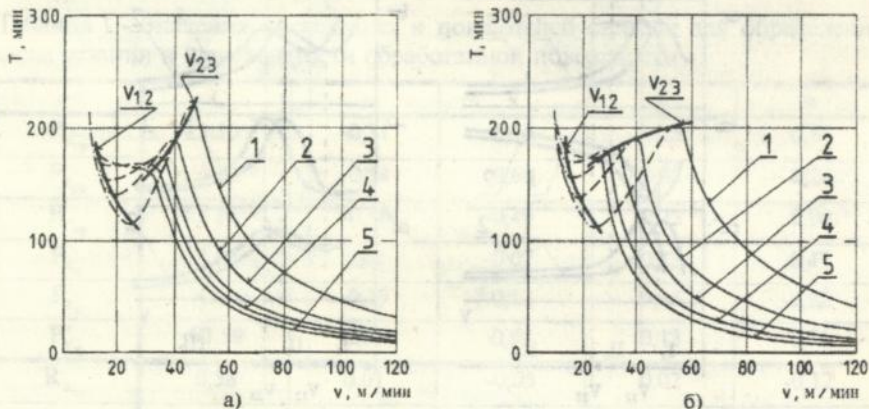


Рис. 10 - Границы скоростных диапазонов

а;  $s$ : 1. 0,025; 2. 0,05; 3. 0,075; 4. 0,1; 5. 0,125 [мм/об] ( $t = 0,1$  мм)

б:  $t$ : 1. 0,05; 2. 0,1; 3. 0,15; 4. 0,2; 5. 0,25 [мм] ( $s = 0,05$  мм/об)

(композит 10;  $\varnothing 45$  мм;  $h_3 = 0,4$  мм)

Основные зависимости аппроксимированы степенными функциями вида:

$$f(v, k_1, P, Q, T, R) = C \cdot v^z \cdot s^x \cdot t^y \cdot D^u \cdot h_3^w$$

Значение постоянных и показателей степени сведены в табл. 2.

Таблица 2 - Значения постоянных и показателей степени для скоростей  $v_{12}$ ,  $v_{23}$ , а также для других характеристик процесса при скоростях выше  $v_{23}$

		C	z	x	y	u	w
К	$v_{12}$	3,50	0	-0,30	-0,11	0	0,23
	$v_{23}$	3,50	0	-0,32	-0,08	0	0,34
М	$K_a$	1,11	-0,25	-0,66	0,27	0,02	-0,01
П	$P_z$	$1,26 \cdot 10^3$	-0,23	0,15	0	0	0
О	$P_y$	$6,67 \cdot 10^3$	-0,15	0,43	0,20	0	0
З	$P_x$	$1,05 \cdot 10^3$	0,20	0,39	0,24	0	0
И	$\Theta$	$0,7 \cdot 10^3$	0,23	0,08	0,03	-0,07	0,21
Т	T	$9,41 \cdot 10^2$	-2,00	-0,87	-0,29	0,72	0
	$R_a$	3,4	-0,12	0,20	-0,11	0,19	0
01	$R_z$	20,8	-0,15	0,26	-0,15	0,16	0
	$R_t$	18,1	-0,15	0,09	0,08	0,18	0

		C	z	x	y	u	w
К	$v_{12}$	1,06	0	-0,41	-0,40	0	0,19
	$v_{23}$	3,32	0	-0,24	-0,49	0	0,16
М	$K_a$	0,57	-0,10	-0,32	0,33	0,19	-0,15
П	$P_z$	$1,05 \cdot 10^4$	-0,26	0,97	0,57	-0,20	0,55
О	$P_y$	$9,03 \cdot 10^3$	-0,14	0,32	0,27	-0,09	1,08
З	$P_x$	$2,7 \cdot 10^4$	-0,34	0,34	1,01	-0,22	0,66
И	$\Theta$	$1,1 \cdot 10^3$	0,20	0,10	0,10	-0,06	0,24
Т	T	$1,61 \cdot 10^2$	-2,03	-0,69	-1,09	0,80	0
	$R_a$	71,2	-0,37	0,58	-0,11	-0,27	0,20
10	$R_z$	78,8	-0,16	0,64	-0,06	-0,07	0,12
	$R_t$	19,6	-0,28	0,42	-0,14	0,26	0,21

В разработанной программе оптимизации процесса резания (рис.11) обеспечивается минимальная себестоимость обработки и максимальная производительность по трем методам.

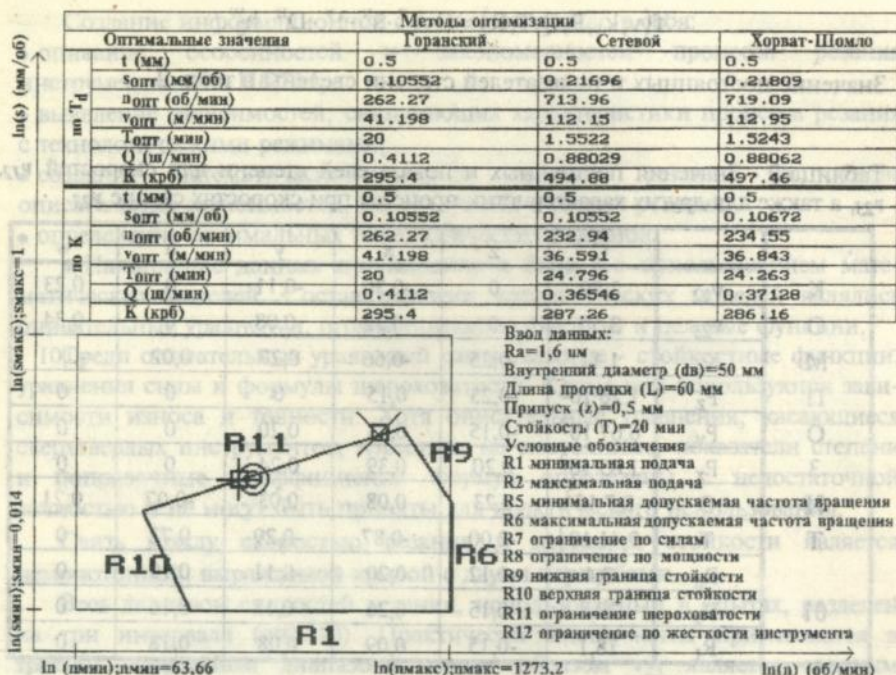


Рис. 11 - Пример оптимизации

### ОБЩИЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

В результате комплексных экспериментально-теоретических исследований решена научно-техническая проблема, имеющая важное значение в создании научных основ повышения эффективности обработки закаленных сталей инструментами из сверхтвердых нитридов бора и расширении областей их рационального использования.

1. На основе комплексного системного подхода выявлены основные физические закономерности и особенности резания закаленных сталей инструментами из сверхтвердых нитридов бора. На этой базе создана математическая модель и банк данных для расчета оптимальных параметров исследуемого процесса резания, разработаны технические рекомендации и прогрессивная технология обработки широкой гаммы изделий из закаленных сталей.

2. Установлено влияние технологических параметров на основные характеристики процесса точения и растачивания: деформацию срезаемого слоя, коэффициент трения, угол сдвига, относительный сдвиг, длину плас-

тического контакта стружки с передней поверхностью инструмента, силы резания и температуру, длину пути резания и стойкость, шероховатость обработанной поверхности и остаточные напряжения в поверхностном слое.

3. Для инструментов из твердых нитридов бора впервые установлено три характерных скоростных диапазона, в которых зависимости основных характеристик процесса резания имеют ярко выраженные экстремумы. Графики таких характеристик как коэффициент трения, коэффициент утолщения стружки, угол сдвига, длина контакта стружки с передней поверхностью резца, температура, силы резания, шероховатость в функции от скорости резания имеют характерную точку перегиба, соответствующую ее оптимальному значению.

4. С использованием экспериментально-аналитических методов исследования установлено влияние условий резания на распространение температуры. Границам трех скоростных диапазонов соответствуют значения температуры, предопределяющие изменения основных характеристик процесса резания. Для нитридоборных инструментов доказана справедливость положения об оптимальных температурах, которые соответствуют оптимальным (по стойкости) скоростям резания при различных сочетаниях глубины и подачи. Найдено влияние скорости, подачи, глубины, силы резания и величины износа на температуру в зоне резания: она повышается с увеличением величины износа, скорости и уменьшением диаметра, роль подачи и глубины менее ощутима.

5. Доказано существенное значение роли налипа (заторможенного слоя) на передней поверхности инструмента в формировании зоны резания и его особенностей. В зоне малых скоростей резания ( $v < v_{12}$  м/мин) наблюдается его зарождение, однако он неустойчив; в дальнейшем ( $v_{12} < v < v_{23}$  м/мин) налип стабилизируется и способствует значительному повышению стойкости инструмента; в зоне высоких скоростей налип вырождается. Эти три скоростных диапазона являются общими и для изменения всех характеристик процесса резания закаленных сталей инструментами из сверхтвердых нитридов бора, что является отражением их глубокой взаимосвязи.

6. Разработана методика аналитического определения параметров шероховатости на основе математической модели формирования микрорельефа, позволяющая управлять шероховатостью обработанной поверхности при точении и растачивании резцами из ПСТМ. Она базируется на обобщенной математической модели режущей кромки сложной конфигурации. Это дает возможность моделировать практически любые схемы формирования микронеровностей профиля детали режущими кромками различной конфигурации при различных комбинациях значений глубины резания и подачи резца.

Общий алгоритм, программы расчета и графического контроля с помощью ЭВМ (персональный компьютер) позволяют аналитически рассчитать, а в сочетании с результатами экспериментальных исследований осуществить достоверное прогнозирование основных параметров шероховатости, а следовательно, определить тип и геометрические параметры режущих инструментов, величины подачи и глубины резания, обеспечивающие заданную чертежом шероховатость обработанной детали. Указанные свойства разработанной методики, алгоритмов и программ позволяют рекомендовать их для использования при разработке систем автоматизированного проектирования и изготовления адаптивных систем в машиностроении.

7. Доказано существенное различие основных закономерностей резания закаленных сталей инструментом из сверхтвердых нитридов бора при точении и растачивании. Растачивание сопровождается большими силами и температурой резания, большей степенью деформации срезаемого слоя, значительным влиянием износа инструмента на все стороны процесса. Анализ экспериментально-аналитической модели процесса растачивания показал тесную связь величины диаметра растачиваемого отверстия с углом сдвига, усадкой стружки, удельной работой стружкообразования, температурой, износом и стойкостью инструмента. Радиальная составляющая силы резания является доминирующей. Максимум стойкости инструмента смещен в сторону меньших скоростей резания. Поэтому традиционное распространение рекомендаций по оптимальным условиям наружного точения на растачивание является не правомерным.

8. Выдвинуто и обосновано научное положение о возможности применения инструмента из сверхтвердых нитридов бора для обработки закаленных сталей в условиях с периодическим изменением действительных геометрических параметров, направления и величины силы и температуры резания. Разработана методика приложения аппарата многопараметрических отображений к моделированию таких условий применительно к обработке полигонных поверхностей. Обобщенный характер формул кинематических и геометрических параметров позволяет применять их для любой точки режущей кромки и любого момента времени обработки независимо от степени их изменения на различных участках профиля. Полученные эшоры распределения кинематических углов, скорости и силы резания по полигонному профилю позволяют обоснованно назначать рациональные передний и задний статические углы, частоту вращения заготовки, обеспечивающие требуемое качество обработанной поверхности. Невзирая на большие циклические нагрузки, резцы из композита 10 проявили высокую работоспособность даже в условиях растачивания. Предложена технология обработки внутренних и внешних полигонных поверхностей изделий из закаленных сталей инструментами из сверхтвердых нитридов бора, что

во многом предопределило расширение применения полигонных моментопередающих соединений.

9. Применением резцов из композита 10 можно обеспечить достаточно большую длину пути резания и высокое качество обработанной поверхности при сравнительно небольших силах резания. Это возможно благодаря наличию в составе композита 10 вюрцитной составляющей, более мелкозернистой и пластичной, чем сфалеритная фаза, которая повышает прочностные характеристики и делает целесообразным его применение в условиях значительных циклических нагрузок.

10. Выдвинуто и доказано научное положение о возможности обеспечения более высокого качества поверхностного слоя с применением лезвийного инструмента из сверхтвердых нитридов бора в сравнении со шлифованием изделий из закаленных сталей. Более предпочтительный уровень шероховатости, микротвердости и формирование в поверхностном слое остаточных сжимающих вместо растягивающих напряжений создают предпосылки замены шлифования точением или растачиванием.

11. Высокая работоспособность инструментов из сверхтвердых нитридов бора связана с наличием заторможенного слоя на передней поверхности инструмента и реализуется в узком диапазоне скоростей резания при строгом соответствии уровня оптимальной температуры максимальному пути резания. Оптимальные температуры при растачивании достигаются при меньших значениях скорости резания в сравнении с точением. Повышение подачи, глубины резания, величины износа и уменьшение диаметра усиливают это различие.

12. Предложена новая обобщенная полиэкстремальная стойкостная зависимость для инструментов из ПСТМ, которая наиболее полно и точно отражает закономерности физических явлений при резании, выраженные в описании точного положения экстремумов и их значений в различных скоростных диапазонах.

13. Разработана автоматизированная система выбора оптимальных выходных характеристик процесса обработки закаленных сталей лезвийными инструментами из сверхтвердых нитридов бора. С использованием установленных физических закономерностей создана математическая модель процесса, включающая систему уравнений, ограничивающие факторы и целевые функции. Структура системы информационного банка данных, подсистема оптимизации режимов резания по параметрам максимальной производительности или минимальной себестоимости, подсистема формирования и вывода полученных результатов позволяют строить высокоэффективные технологические процессы обработки закаленных сталей инструментами из сверхтвердых нитридов бора.

14. Практическая реализация разработок и рекомендаций на ряде заводов России, Украины и Венгрии дала значительный экономический эффект.

#### ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ ОТРАЖЕНО В РАБОТАХ:

1. Кундрак Я.: Резание при периодических нагрузках резами из сверхтвердых материалов. - Харьков-Мишкольц: изд. Мишкольцкого Университета, 1996. - 90.с.

2. Fridrik L., Gyáni K. Kövesi Gy., Kundrák J., Szabó S.: Система для лезвийных инструментов с рабочей частью из сверхтвердых материалов (PCD/CBN Tools System) (Венгер.) / Egyetemi szolgálati szabadalom, Miskolc, 1992. november 25. Közzételti szám: T/68 814. Közzététel időpontja: 1995. július 28. Патент Венгрии

3. Fridrik L., Kundrák J., Szabó Z., Varga J., Grabchenko A. I., Pyzhov I. N., Federovich V. A., Nakonechnyj N. F., Alekseev K. M.: Метод управления рабочей поверхностью шлифовальных кругов на электропроводных связках. (Венгер.) // Szabadalmi bejelentés, Miskolc, 1992. december 21. Közzételti szám: T/69 183. Közzététel időpontja: 1995. július 05. Патент Венгрии

4. Перепеллица Б.А., Кундрак Я., Сашкова Н.В. Аналитическое определение кинематических геометрических параметров при точении и растачивании полигонных поверхностей. // Резание и инструмент. - 1987. - № 37. - с.43-47.

5. Кундрак Я., Литовченко П.И., Шарамко С.А. Аналитическое определение параметров шероховатости поверхности, обработанной резами из ПСТМ. // Резание и инструмент. - 1988. - № 39. - с.43-51.

6. Кундрак Я. Износостойкость резцов из композита 10 при растачивании полигонных отверстий в деталях из закаленных сталей. // Резание и инструмент. - 1988. - № 40. - с.47-51.

7. Кундрак Я., Фридрих Л. Особенности износа и стойкость резцов из композита при растачивании закаленных сталей. // Intersymposium Badania parzedzi 88. Krakow. pp.106-108.

8. Кундрак Я., Зубарь В.П. Работоспособность резцов из композита при растачивании закаленных сталей. // Резание и инструмент. - 1989. - № 41. - с.107-111.

9. Кундрак Я. Динамические явления при растачивании полигонных отверстий резами из композита К10Д. // Резание и инструмент. - 1989. - № 42. - с.45-49.

10. Кундрак Я. Износ и стойкость резцов из композита 10 при растачивании цилиндрических и полигонных отверстий. // Резание и инструмент. - 1989. - № 42. - с.103-105.

11. Kundrak J. Boring of Polygonal Holes Using Composite 10 Inserts. // Zeszyty Naukowe, Wydziału Mechanicznego nr 11., Koszalin, 1989. pp. 299-307.

12. Зубарь В.П., Кундрак Я. Особенности стружкообразования при растачивании резцами из ПСТМ. // Резание и инструмент. - 1990. - № 43. - с.99-103.
13. Кундрак Я., Фридрих Л., Варга Я. Заточка лезвийного инструмента из ПСТМ и возможности повышения ее эффективности. (венгер.) // MECHATRONINFO 90. Kecskemet, 1990. november 13-15. pp.335-409.
14. Кундрак Я. Особенности процесса растачивания закаленных сталей резцами из ПСТМ. // Сверхтвердые материалы. - 1991. - № 5. - с.42-46.
15. Кундрак Я. Производство, применение и заточка лезвийных инструментов из сверхтвердых материалов. (венгер.) // Zárószimpózium, Budapest. 1991. júl.8-12. pp.168-185.
16. Кундрак Я., Пап Й. Повышение производительности и качества при лезвийной обработке инструментами из ПСТМ. (венгер.) // Gépgyártástechnológia, 1991. 8-9.sz. pp.393-402.
17. Фридрих Л., Кундрак Я., Сабо З., Пыжов И.Н., Алексеев К.М. Электроинтенсивное шлифование сверхтвердых материалов, обеспечивающее высокую производительность и качество поверхности. // Gépgyártástechnológia, 1991. 8-9.sz. pp.379-385.
18. Кундрак Я. Проблемы растачивания гладких и полигонных отверстий резцами из сверхтвердых материалов. "Проблемы резания материалов в современных технологических процессах." Часть 1. Международный научно-технический семинар Харьков-Алушта 1991, окт. 4-8, с.с. 207-211.
19. Кундрак Я., Махунка И., Сабо З., Сюч Я. Измерение износа радиоактивного инструмента в процессе резания методом "IN - PROCESS". (венгер.) // Выставка-конференция microCAD-SYSTEM92, Мишколец, 1992, февр. 25-29, с.512-523.
20. Кундрак Я., Русанов В.В. Опыт производства лезвийных режущих инструментов из ПСТМ в Венгрии. // Сверхтвердые материалы. - 1992. - № 5. - с.37-39.
21. Kundraк J., Szabó Z. Process, method and equipment for grinding of hard materials. // TECHNOLOGY92., KASSA, 1992. sept.8. pp.224-227.
22. Кундрак Я. Закономерности процесса резания при растачивании закаленных сталей резцами из сверхтвердых материалов. // TECHNOLOGY92., KASSA, 1992. sept.8. pp.218-223.
23. Kundraк J., Lövei P., Szabó Z.: Intensive grinding as the productive machining of hard and superhard materials / Technologia obrábania v automatizovanej strojárскеj vyrobe, Kosice, 1993. jan. 12-14. p.91-96.
24. Кундрак Я. Разработка и исследование процесса микрорезания. // Высокие технологии в машиностроении. Интерпартнер92, Алушта 5-7 окт. 1992, с.80-82.
25. János Kundraк. Surface quality of hardened steel bored with composite tool. // IV. INTERNATIONAL SYMPOSIUM OSN92. Krakkó, 1992.okt.22-24. pp.115-122.

26. Дьяни К., Кундрак Я., Сабо Ш. Классификация лезвийных инструментов из ПСТМ. (венгер.). // Gépgyártástechnológia, 1992. No 11. pp: 466-469.

27. Kundrač J. Productivity and quality improving with superhard tool material. // Technológia obrábění v automatizovanej strojárскеj vyrobe, Kosice, 1993. jan. 12-14. pp.85-90.

28. Кундрак Я. Особенности процесса резания при прецизионной и ультрапрецизионной обработке закаленных сталей. (венгер.). // VIII. Nemzetközi Szerszámkonferencia. Miskolc, 1993. augusztus 30-szeptember 1. pp.:312-316.

29. Кундрак Я. О шероховатости поверхности полигонных отверстий, расточенных резами из композита 10. // Резание и инструмент. - 1993. - № 47. - с.155-157.

30. Кундрак Я. Теоретические аспекты растачивания лезвийными инструментами из сверхтвердых материалов при малых сечениях среза. // Резание и инструмент. - 1993. - № 47. - с.174-176.

31. Кундрак Я. Тепловые явления при растачивании резами из композита закаленных стальных деталей. // Исследования в области инструментального производства и обработки металлов резанием, Тула, 1993, с.с. 95-99.

32. Кундрак Я. Алгоритм аналитического расчета действительных геометрических параметров при токарной обработке полигонных валов и отверстий. // Исследования в области инструментального производства и обработки металлов резанием, Тула, 1993, с.с. 105-107.

33. Kundrač J. Characteristics of Chip Removal in Boring Cylindrical and Polygon Surfaces. // 2nd International Scientific Conference. Modern Machines and Technologies, MTM '93. Cugir, Romania, 1993. október 14-16. pp.:119-122.

34. Kundrač J. Surface Integrity of Hardened Steels Machined by CBN Tools. // 2nd International Techno-Scientific Conference on Influence of Production Engineering on State of the Surface Layer, SL '93. Gorzow WLKP.-Lubniewice, 1993. október 20-22. pp.:476-480.

35. Kundrač J., Szabó Z., Szűcs J., Mahunka I., Vasváry L. Activation technique for "in-process" wear measurement in precision machinery. // Archiwum technologii maszyn i automatyzacji, zeszyt 11/1993. pp. 267-274.

36. Kundrač J. Cutting of Cylindrical and Polygon Inner Surfaces by CBN Tool. // Results of the Scientific Cooperation between the Polytechnical University of Kharkov and University of Miskolc. Konferencia, MISKOLC, 1994. márc. 2. pp.:63-70.

37. Perepelica B. A., Kundrač J. Now to use the multiparameter mapping to describe the kinematics of metal cutting. // Results of the Scientific Cooperation between the Polytechnical University of Kharkov and University of Miskolc. Konferencia, MISKOLC, 1994. márc. 2. pp.95-98.

38. L. Vasváry, F. Ditrói, S. Takács, Z. Szabó, J. Szűcs, J. Kundrač, I. Mahunka. Wear measurement of the cutting edge of superhard turning tools using TLA technique. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 85. North-Holland, 1994. pp. 255-259.

39. Кундрак Я. Резание инструментами из ПСТМ при периодически изменяющихся условиях. (венгер.). // Borsodi Műszaki Gazdasági Élet, XXXIX. évf., 4-5. szám. Miskolc, 1994. április-május, pp. 208-212.



### Summary

Kundrák János. "The Scientific Principles of Increasing the Effectiveness of Inner Surfaces' Cutting with CBN Tools"

A thesis defended for a D.Sc. degree in engineering in speciality 05.03.01. - The processes of mechanical machining, machine tools and tool. Kharkov State Polytechnical University, Kharkov, 1996.

This work is the first to establish the scientific basis of hardened steels' cutting with CBN tools under constant and changing circumstances with a complex and systematic approach to work out the physical and mathematical basis of the cutting process to compare the quality of the surface layer with other machining. The conceptual possibility and the economic appropriateness of the polygon surfaces machining with CBN tools have been proved in this work, especially in the case of inner surfaces. This work has explored the physical principles of the way of machining mentioned above which have been applied for the establishment of the process' mathematical model and for the setting up of data banks and automatic systems the role of which is to define the rational conditions of machining. A recommendation has been made for optimazing data for the cutting of hardened steels with CBN tools and also for technical and technological conditions for the machining process with greater effectiveness.

### Анотація

УДК 621.923. Кундрак Я. Наукові основи підвищення ефективності лезвийної обробки внутрішніх поверхонь інструментами з ПНТМ на основі нітриду бору. Автореферат дисертації на злотуття наукового ступеня доктора технічних наук по спеціальності 05.03.01. - Процеси механічної обробки, верстати та інструмент. Харківський державний політехнічний університет, Харків, 1996.

В роботі вперше реалізовано комплексний системний підхід з метою створення наукових основ високоефективних процесів лезвийної обробки загартованих сталей інструментами із надтвердих нітридів бору в умовах сталого та перемінного різання, фізичного та математичного опису процесу обробки, якості поверхневого шару в порівнянні з іншими методами обробки. Доведено принципову можливість та економічну доцільність обробки полігонних поверхонь інструментами з ПНТМ, особливо обробки внутрішніх поверхонь. Встановлені закономірності обробки використані при математичному моделюванні процесу та створенні банку даних і автоматизованої системи призначення раціональних умов обробки. Запропоновані оптимальні нормативи обробки загартованих сталей інструментами з надтвердих нітридів бору, технологічні та технічні рекомендації для реалізації високоефективних процесів обробки.

Ключевые слова: механическая обработка, лезвийные инструменты, сверхтвердые материалы, процесс резания, качество поверхностного слоя, переменное резание, математическая модель, оптимизация режимов резания.

*Andriy JA*

---

Подп. к печати 26.04.96. Формат 60x84/16. Бумага типограф.  
Усл. печ. л. 2.0. Тираж 120. Зак.№ 23-10.

---

Харьковский государственный политехнический университет,  
редакционно-издательский отдел.  
Отпечатано на ризографе ХГПУ.  
310002, г.Харьков, ул. Фрунзе, 21.

446996

AB 34.620

**AB 34.620**