

На правах рукописи

Артамонов Евгений Владимирович

**ПОВЫШЕНИЕ РАБОТОСПОСОБНОСТИ
СБОРНЫХ РЕЖУЩИХ ИНСТРУМЕНТОВ
НА ОСНОВЕ ИССЛЕДОВАНИЯ НАПРЯЖЕННО-
ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ И
ПРОЧНОСТИ СМЕННЫХ ТВЕРДОСПЛАВНЫХ
ПЛАСТИН**

Специальность: 05.03.01 «Технологии и оборудование механической и
физико-технической обработки»

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
доктора технических наук

Томск - 2003

Работа выполнена на кафедре «Станки и инструменты»
Тюменского государственного нефтегазового университета

Научный консультант	- доктор технических наук, профессор Утешев Мирабо Хусаинович
Официальные оппоненты	- доктор технических наук, профессор Розенберг Юрий Александрович
	- доктор технических наук, профессор Петрушин Сергей Иванович
	- доктор технических наук, профессор Шаламов Виктор Георгиевич
Ведущая организация	- Московский государственный технологический университет «Станкин»

Защита состоится «___»_____2003 г. в___ час. на заседании
диссертационного совета Д.212.269.01 при Томском политехническом
университете по адресу: 634050, г.Томск, пр. Ленина, 30, корп. 4, ауд. 210.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической
библиотеке Томского политехнического университета (634034, г.Томск,
ул. Белинского, 55).

Автореферат разослан «___»_____2003 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор технических наук, профессор

С.В. Кирсанов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В условиях рыночной экономики эффективность машиностроительного производства во многом определяется использованием прогрессивных металлорежущих инструментов. Одним из путей подъема эффективности механической обработки резанием является переход с использования напайного режущего инструмента на сборный с механическим креплением сменных многогранных пластин (СМП) из твердых сплавов, очевидные преимущества которого подтверждены мировой практикой.

Однако производственная статистика свидетельствует о том, что на долю отказов инструментов с СМП из инструментальных твердых сплавов (ИТС) в результате разрушения пластин приходится 70-75%. Анализ видов отказов режущих пластин в производственных условиях показал, что характерными видами разрушений являются выкрашивание, скалывание, поломка.

Существует большое количество практических рекомендаций в инструментальных каталогах и справочниках по применению сборного инструмента, но не разработаны инженерные методики выбора и расчета СМП на основе прочностного подхода.

Особенности износа и разрушения режущих элементов из твердых сплавов во всем температурном диапазоне нельзя объяснить только с позиций существующих представлений о взаимосвязи явлений при резании металлов. Поэтому возникает необходимость более детального изучения НДС, механики разрушения и прочности режущих пластин из твердых сплавов, как структурно неоднородных материалов, с учетом их физико-механических характеристик, изменяющихся в зависимости от температуры.

На сегодняшний день имеются результаты экспериментальных и теоретических исследований НДС и методики инженерных расчетов на прочность режущего клина инструмента. Однако решение задачи о НДС и прочности СМП из ИТС отличается тем, что пластины имеют разные конструктивные параметры, схемы базирования и крепления их в корпусе инструмента и испытывают сложное НДС, определяемое не только внешним силовым и температурным нагружением, но и внутренними температурными микронапряжениями (напряжения II рода).

Поэтому исследование НДС, механики разрушения и прочности СМП из твердых сплавов с целью повышения работоспособности сборных режущих инструментов является актуальной проблемой.

Диссертационная работа выполнялась в рамках комплексных программ «Авиационная технология» - 05.01 по направлению «Методы механической обработки», по планам госбюджетных и хоздоговорных НИР Тюменского государственного нефтегазового университета.

Целью работы является научно-обоснованное повышение работоспособности сборных режущих инструментов на основе результатов исследования напряженно-деформированного состояния и прочности сменных твердосплавных пластин.

Для достижения цели в работе поставлены следующие **задачи**:

1. Разработать модели напряженно-деформированного состояния СМП из ИТС, механики их разрушения, прочности и максимальной работоспособности с учетом напряжений первого и второго рода, состояния ИТС.

2. Разработать новый экспериментально-теоретический метод определения НДС и температурных полей в СМП из ИТС на основе лазерной интерферометрии.

3. Исследовать НДС и прочность СМП из ИТС с учетом их физико-механических характеристик, конструктивных и геометрических параметров, схем базирования, крепления, условий силового и температурного нагружения при резании экспериментально, на основе лазерной интерферометрии, и численным методом, на основе конечных элементов.

4. Установить взаимосвязь изменений механических характеристик ИТС при температурно-силовом воздействии с прочностью и работоспособностью СМП сборных инструментов.

5. Разработать методики определения условий максимальной работоспособности сборных инструментов по зависимостям изменения механических характеристик твердых сплавов при температурно-силовом воздействии от температуры.

6. Разработать научно-обоснованную методологию расчета НДС, прочности СМП и определения условий эксплуатации пластин из ИТС, обеспечивающих максимальную работоспособность инструментов.

7. На основании результатов исследований разработать новые технические и технологические решения.

Методы исследований. Исследования основаны на использовании фундаментальных положений теории упругости и пластичности, современных численных методов решения задач с использованием метода конечных элементов, экспериментально-теоретического метода исследования НДС СМП сборных инструментов с применением лазерной интерферометрии, разработанного автором. Экспериментальные исследования выполнялись в лабораторных и производственных условиях и включали изучение НДС, механики разрушения, прочности и работоспособности СМП.

Достоверность определения напряжений и деформаций по разработанным методикам: экспериментальной – лазерной интерферометрии и расчетной – конечных элементов, подтверждается хорошей корреляцией результатов решения тестовых задач, полученных с применением этих методов, и по формулам теории упругости с требуемой

для инженерных расчетов точно. Повышение прочности разработанных СМП и работоспособности сборных инструментов подтверждено так же результатами практических испытаний и внедрением их на производстве.

Научная новизна:

1. Впервые разработаны модели напряженно-деформированного состояния СМП из твердых сплавов, механики их разрушения, прочности и работоспособности с учетом напряжений I и II рода, цикличности нагружения, состояния ИТС при резании: упругого, упругопластического, пластического и текучести кобальтовой связки.

2. На основе лазерной интерферометрии разработан новый экспериментально-теоретический метод определения НДС и температурных полей в СМП из ИТС, позволяющий определять составляющие напряжения в любой точке исследуемого поля пластин при реальных режимах резания.

3. Разработан новый способ определения модуля упругости E и коэффициента Пуассона μ малоупругих инструментальных твердых сплавов.

4. Впервые экспериментально, методом лазерной интерферометрии, и расчетным путем, с применением метода конечных элементов, установлены закономерности распределения напряжений в пластинах из ИТС для различных конструктивных параметров, схем базирования, крепления, условий силового и температурного нагружения, опасные зоны в СМП, позволяющие управлять напряженно-деформированным состоянием и прочностью пластин.

5. Впервые выдвинуты и доказаны гипотезы о том, что каждый ИТС при температурно-силовом воздействии имеет характерные температуры:

- перехода из зоны упругого в зону упругопластического состояния, которая соответствует температуре максимальной трещиностойкости $\theta_{м.тр.}$ ИТС и определяется по первой точке перегиба зависимости ударной вязкости сплава от температуры $KCV=f(\theta)$;

- перехода из зоны упругопластического в зону пластического состояния, которая соответствует температуре максимальной работоспособности $\theta_{м.р.}$ ИТС и определяется по второй точке перегиба зависимости ударной вязкости сплава от температуры $KCV=f(\theta)$ или по точке перегиба зависимости логарифма твердости по Виккерсу от температуры $lgHVN=f(\theta)$.

6. Разработаны модели расчета температур максимальной трещиностойкости $\theta_{м.тр.}$ и максимальной работоспособности $\theta_{м.р.}$ инструментальных твердых сплавов группы ВК.

7. Разработан способ снятия напряжений II рода в ИТС с целью повышения работоспособности инструментов путем предварительного нагрева режущих пластин до температуры максимальной трещиностойкости сплава.

8. Впервые экспериментально установлена цикличность НДС режущей части инструмента при разных видах стружкообразования, являющаяся одной из основных причин развития трещин и усталостного хрупкого разрушения СМП из ИТС.

Выполненная работа направлена на решение научной проблемы: «Повышение работоспособности сборных режущих инструментов путем увеличения прочности СМП из твердых сплавов группы ВК на основе результатов исследования их НДС с учетом напряжений I и II рода, цикличности нагружения, состояния ИТС при резании: упругого, упругопластического, пластического и текучести кобальтовой связки».

Практическая ценность результатов исследований:

1. Разработана научно-обоснованная методология расчета, проектирования и эксплуатации СМП из ИТС и сборных инструментов на основе

прочностного подхода, направленная на повышение их работоспособности.

2. На основе лазерной интерферометрии разработаны установка для экспериментального исследования НДС и температурных полей в СМП из ИТС при резании (А.С. №1173179, Пат. РФ № 2086914), способ определения модуля упругости E и коэффициента Пуассона μ инструментальных твердых сплавов (Пат. РФ № 1744445, №2023252).

3. Разработаны новые методики определения скорости резания инструментами с СМП по температуре максимальной работоспособности, определяемой по точке перегиба зависимости логарифма твердости ИТС по Виккерсу от температуры $\lg HV=f(\theta)$ (Пат. РФ №2173611), или по второй точке перегиба зависимости ударной вязкости ИТС от температуры $KCV=f(\theta)$ (реш. о выдаче Пат. РФ по заяв. №2001135677).

4. Разработана номограмма для графоаналитического определения температур максимальной работоспособности, трещиностойкости и инструментального коэффициента K_n ИТС.

5. Разработан способ повышения работоспособности инструментов путем предварительного нагрева режущих пластин до температуры максимальной трещиностойкости ИТС (Пат. РФ № 2207936).

6. Разработаны новые сменные пластины повышенной прочности с криволинейной режущей кромкой (Пат. РФ №2201316) и конструкции сборных инструментов повышенной работоспособности (А.С. №№ 778940, 948546, 1143526).

На защиту выносятся:

1. Модели напряженно-деформированного состояния СМП, механики их разрушения, прочности и работоспособности с учетом напряжений I и II рода, цикличности нагружения, состояния ИТС: упругого, упругопластического, пластического и текучести кобальтовой связки.

2. Экспериментально-теоретический метод и установки определения НДС и температурных полей в СМП из ИТС, способ определения модуля упругости E и коэффициента Пуассона μ , созданные на основе лазерной интерферометрии.

3. Впервые установленные экспериментально и численным методом закономерности распределения напряжений и деформаций в СМП из ИТС для различных конструктивных параметров пластин, схем базирования и крепления, условий их силового и температурного нагружения.

4. Впервые установленные характерные температуры инструментальных твердых сплавов при температурно-силовом воздействии на них:

- максимальной трещиностойкости, определяемой по первой точке перегиба зависимости ударной вязкости (KCV) от температуры;

- максимальной работоспособности, определяемой по второй точке перегиба зависимости ударной вязкости (KCV) от температуры или по точке перегиба зависимости логарифма твердости по Виккерсу ($\lg HV$) от температуры.

5. Методология расчета НДС, прочности СМП и определения условий эксплуатации пластин из ИТС, обеспечивающих максимальную работоспособность инструментов.

6. Впервые экспериментально установленный факт цикличности НДС режущей части инструмента, обусловленной периодическими сдвигами элементов обрабатываемого материала в зоне резания при разных видах стружкообразования.

7. Номограмма для определения температур максимальной работоспособности, трещиностойкости и инструментального коэффициента ИТС.

8. Способ и устройство повышения работоспособности инструментов путем предварительного нагрева режущих пластин до температуры максимальной трещиностойкости ИТС, осуществляемого до начала процесса резания.

9. Новые сменные пластины повышенной прочности с криволинейной режущей кромкой и разработанные конструкции сборных инструментов повышенной работоспособности.

Реализация полученных результатов:

1. Разработаны руководящие технические материалы «Повышение работоспособности инструментов с режущими элементами из инструментальных твердых сплавов при обработке деталей из труднообрабатываемых материалов», которые внедрены на ОАО «Тюменские моторостроители».

2. Разработанные конструкции сменных неперетачиваемых пластин с криволинейной режущей кромкой повышенной прочности и сборные инструменты с ними испытаны и внедрены на ЗАО «Сибнефтемаш».

3. «Рекомендации по выбору и расчету СМП сборных инструментов» испытаны и внедрены на ЗАО «Тюменские авиадвигатели».

4. Разработаны новые конструкции сборных инструментов с СМП повышенной работоспособности: резцы, зенкеры, торцовые и цилиндрические фрезы, протяжки для обработки наружных поверхностей и отверстий, ряд из которых внедрен на предприятиях, в том числе оборонных: организация п/я М-5647 г. Москва, 125833, ГСП, А-47; организация п/я г. Москва, 101000, Центр; Дебальцевский завод по ремонту металлургического оборудования, Донецкая область; Тартуский опытный завод пластмассовых изделий, г. Тарту; ОАО Тюменские моторостроители; ОАО Тюменский станкостроительный завод; ОАО Ишимский машиностроительный завод.

В целом новые технические и технологические решения защищены 13 авторскими свидетельствами и патентами, которые были внедрены на 9 предприятиях СССР и Российской Федерации со значительным экономическим эффектом.

Были удовлетворены запросы на документацию разработанных конструкций сборных инструментов с СМП более чем с 30 машиностроительных предприятий.

Результаты исследований широко используются в учебном процессе. Издано 4 учебных пособия, поставлены курс лекций и цикл лабораторных работ по дисциплине «Режущий инструмент».

Личный вклад автора состоит в формулировании концепции работы, разработке моделей НДС, прочности и работоспособности СМП из ИТС сборных инструментов; разработке экспериментально-теоретического метода и установок для определения силовых, температурных деформаций и напряжений в СМП инструментов с применением лазерной интерферометрии и получении результатов; разработке методологии расчета, проектирования и эксплуатации СМП сборных инструментов повышенной работоспособности; разработке новых технических и технологических решений, защищенных авторскими свидетельствами и патентами.

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы доложены на 3 международных, 5 всесоюзных, 6 всероссийских, 8 зональных научно-технических конференциях за период с 1970 по 2003 гг. в Москве, Санкт-Петербурге, Волгограде, Киеве, Краматорске, Екатеринбурге, Челябинске, Львове, Днепропетровске, Иркутске, Красноярске, Новосибирске, Омске, Кургане, Кемерово, Томске.

Под руководством автора и с использованием отдельных положений его научной концепции подготовлены и защищены 3 кандидатские диссертации. Установка для исследования деформаций и напряжений в режущем инструменте при резании, разработанная с участием автора, экспонировалась на ВДНХ СССР и была удостоена бронзовой медали. За

внедрение изобретений в производство автор награжден знаком «Изобретатель СССР».

В полном объеме диссертация заслушана и одобрена на объединенных научных семинарах кафедр «Станки и инструменты», «Технология машиностроения», «Материаловедение и технологии конструкционных материалов» Тюменского государственного нефтегазового университета, «Технология машиностроения, резание и инструмент» и «Автоматизация и роботизация в машиностроении» Томского политехнического университета, «Оборудование и инструмент компьютеризированного производства» Южно-Уральского государственного университета.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 103 печатных работы. В том числе 4 монографии, 13 авторских свидетельств и патентов на изобретения.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения, библиографического списка из 260 наименований, изложенных на 333 страницах машинописного текста, приложения, включает 246 рисунков, 10 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе приведен литературный обзор экспериментальных и теоретических исследований по теме диссертации, на основе которого сделан анализ и сформулированы цели и задачи настоящего исследования.

Вопросам повышения эффективности механической обработки металлов резанием и применения режущих инструментов посвящены фундаментальные работы: А.А. Авакова, Г.С. Андреева, В.Ф. Безъязычного, А.И. Бетанели, В.Ф. Боброва, С.А. Васина, А.С. Верещака, Г.И. Грановского, В.А. Гречишникова, М.Б. Гордона, Н.Н. Зорева, Ю.Г. Кабалдина, М.И. Клушина, С.В. Кирсанова, Г.Л. Куфарева, В.С. Кушнера, Т.Н. Лоладзе, А.Д. Макарова, И.Я. Мирнова, В.С. Мухина, В.А. Остафьева, С.И. Петрушина, В.Г. Подпоркина, В.Н. Подураева, М.Ф. Полетика, Б.П. Прибылова, А.И. Промптова, А.Н. Резникова, А.М. Розенберга, Ю.А. Розенберга, В.Ф. Романова, В.К. Старкова, С.С. Силина, Н.В. Талантова, И.П. Третьякова, М.Х. Утешева, Г.Л. Хаета, Л.А. Хворостухина, В.Г. Шаламова, Ю.С. Шарина и др.

А.С. Верещака, Н.Н. Зорев, Г.С. Креймер, Т.Н. Лоладзе, Н.В. Талантов, Л.Г. Куклин, В.И. Сагалов, В.Б. Серебровский С.П. Шабашов в своих работах показали, что значимое влияние на работоспособность инструментов оказывают механические свойства ИТС и их циклическая прочность.

Результаты исследований физико-механических свойств твердых сплавов приведены в работах В.И. Горбачевой, М.Д. Киффера, Г.С. Креймера, М.Г. Лошака.

Исследованию НДС, прочности и работоспособности металлорежущих инструментов посвящены работы: Г.С. Андреева, А.И. Бетанели, В. Катвинкеля, Т.Н. Лоладзе, А.С. Верещака, Н.Н. Зорева, Ю.Г. Кабалдина, В.А. Остафьева, С.И. Петрушина, В.Г. Подпоркина, М.Ф. Полетика, Б.П. Прибылова, М.Х. Утешева. Однако в приведенных работах авторы занимались в основном исследованиями НДС и прочности режущего клина инструмента.

Изучению прочности и работоспособности СМП из ИТС сборных инструментов на основе прочностного подхода посвящено незначительное количество работ: А.С. Верещака, В.А. Гречишникова, П. Леопольда, Л.М. Миранцова, С.И. Петрушина, Р. Симона, Г.Л. Хаета.

Исследования Пфау и Рикса показали наличие напряжений II рода в твердых сплавах, которые должны оказывать существенное влияние на работоспособность инструментов в определенном температурном диапазоне.

Однако в работах, изложенных выше не рассматривались в единой системе влияние схем базирования и крепления, условий нагружения, конструктивных и геометрических параметров СМП, механических характеристик ИТС, меняющихся от температуры резания, на НДС и прочность пластин с целью повышения работоспособности инструментов.

На основании проведенного литературного анализа были сформулированы цель и задачи исследования.

Во второй главе выявлена качественная взаимосвязь механических характеристик (ИТС) с особенностями износа, разрушения режущих пластин и работоспособностью инструментов, разработаны модели напряженно-деформированного состояния СМП, прочности и механики разрушения пластин с учетом напряжений I и II рода, цикличности нагружения и состояния ИТС во всем температурном диапазоне резания металлов.

На основании изучения результатов исследований по оптимизации режимов резания деталей из труднообрабатываемых материалов и физико-механических свойств твердых сплавов, проведенных по литературным источникам в первой главе, было сформулировано предположение о существенном влиянии механических характеристик ИТС на работоспособность инструментов.

Сравнительный анализ предельных значений основных механических характеристик твердых сплавов в зависимости от температуры, приведенных в монографии Г.С. Креймера (рис. 1, а), с особенностями износа режущих элементов инструментов из твердых сплавов на примере исследований Н.Н. Зорева (рис. 1, б) показал, что из большого количества механических характеристик ИТС только две отражают особенности износа и разрушения пластин из ИТС и соответственно работоспособность инструментов: зависимости ударной вязкости KCV и логарифма твердости по Виккерсу lgHV от температуры (рис. 1, б), как имеющие характерные точки перегиба при соответствующих температурах, которые хорошо коррелируют с температурами резания, определяющими особенности износа и разрушения инструментов из ИТС. На основании из-

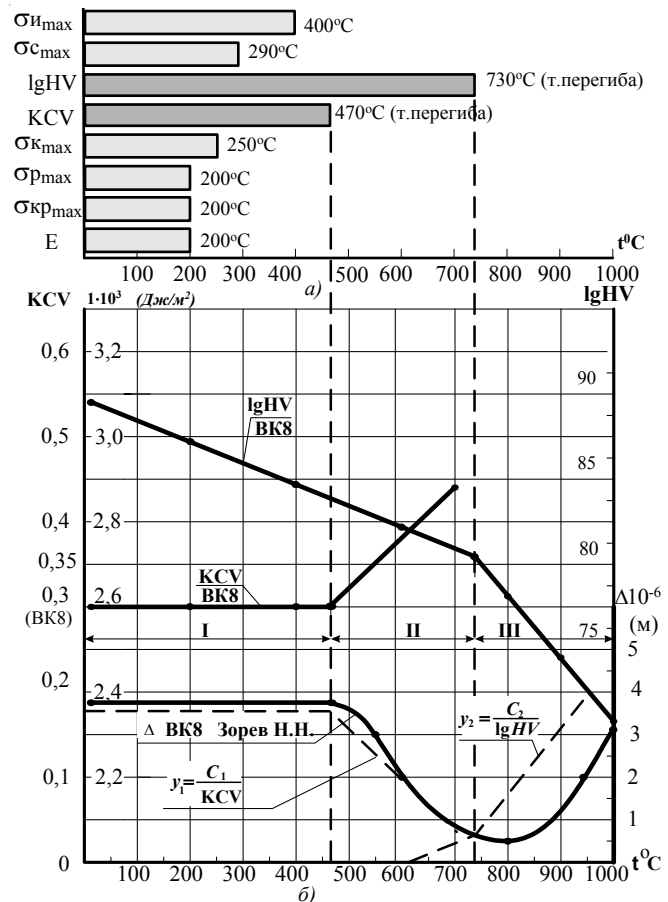


Рис. 1. Взаимосвязь механических характеристик сплава BK8 с износом резца при точении молибдена MO1

первая - каждый инструментальный твердый сплав (ИТС) при температурно-силовом воздействии (т.с.в.) может находиться в зависимости от температуры в одном из состояний: упругом - I, упругопластическом - II, пластическом - III, текучести кобальтовой связки - IV, что должно определять соответствующий характер разрушения пластин;

вторая - температура, при которой твердый сплав при т.с.в. переходит из упругого в упругопластическое состояние, а на графике ударной вязкости твердого сплава $KCV=f(\Theta^{\circ})$ имеет место точка первого

перегиба, соответствует температуре максимальной трещиностойкости режущей пластины из данного ИТС;

третья - температура, при которой твердый сплав при т.с.в. переходит из упругопластического в пластическое состояние, а на графике логарифма твердости по Виккерсу $\lg HV = f(\Theta)$ твердого сплава имеет место точка перегиба, соответствует температуре максимальной работоспособности режущей пластины из данного ИТС.

В соответствии с теорией Шпета, при изготовлении твердого сплава на стадии остывания после спекания в результате разных коэффициентов линейного расширения WC и Co в нем возникают температурные микронапряжения (напряжения II рода). При этом образуются напряжения растяжения в связке Co и сжатия во включении WC, которые могут быть снижены при последующем нагреве ИТС.

На основании изложенного выше была сформулирована четвертая гипотеза - для снижения температурных микронапряжений (напряжений II рода) в СМП из твердых сплавов группы ВК необходимо предварительно, до начала процесса резания, подогреть их до температуры перехода сплава из упругого в упругопластическое состояние, т.е. до температуры максимальной трещиностойкости, что обеспечит повышение работоспособности режущих пластин.

Таким образом, при определении НДС режущих элементов из ИТС необходимо наряду с напряжениями I рода учитывать напряжения II рода.

Для решения этой задачи была разработана математическая модель температурных микронапряжений (напряжений II рода) в СМП из ИТС, полученная на основании уравнений теории упругости. Рассмотрена задача в неограниченной среде со сферическим включением радиуса r_0 (Рис. 2). При изменении температуры на величину ΔT возникают температурные микронапряжения. Материал включения (WC) и среды (Co) полагаются упругими. Соответственно E_1, ν_1, α_1 - модуль упругости, коэффициент Пуассона и коэффициент линейного расширения включения, E_2, ν_2, α_2 - среды. Принимаем, что все параметры не зависят от температуры. Задача является центрально - симметричной. Поместим начало сферической системы координат r, φ, θ в центр включения.

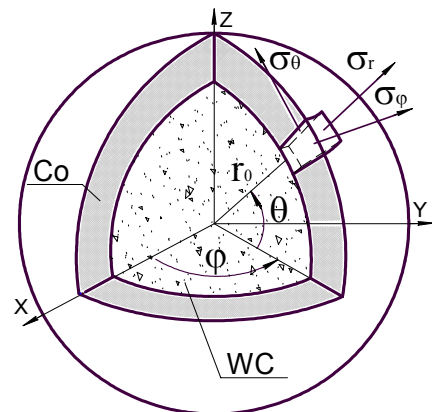


Рис. 2. Схема модели температурных микронапряжений в двухфазном твердом сплаве

В силу симметрии перемещения: $U_\varphi = U_\theta = 0, U_r = U_r(r).$

На основании уравнений деформаций, напряжений и равновесия были выведены математические модели температурных микронапряжений:

- во включении с радиусом r_0 (WC):

$$\sigma_r^{(1)} = \sigma_\varphi^{(1)} = \sigma_\theta^{(1)} = \frac{E_1}{(1+\nu_1)(1-2\nu_1)} (1+\nu_1)c_1^{(1)} - \frac{E_1\alpha_1}{1-2\nu_1}\Delta T, \quad (1),$$

где

$$c_1^{(1)} = \frac{c_2^{(2)}}{r_0^3} + \alpha_2\Delta T;$$

- в среде (CO):

$$\sigma_r^{(2)} = \frac{2E_2}{1+\nu_2} \cdot \frac{c_2^{(2)}}{r_0^3}, \quad (2)$$

$$\sigma_\varphi^{(2)} = \sigma_\theta^{(2)} = \frac{E_2}{1+\nu_2} \cdot \frac{c_2^{(2)}}{r_0^3}, \quad (3)$$

где

$$\frac{c_2^{(2)}}{r_0^3} = \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)\Delta T}{1 + \frac{E_2}{E_1} \cdot \frac{2(1-2\nu_1)}{1+2\nu_2}}.$$

В итоге была разработана расчетная модель НДС СМП из твердых сплавов с учетом напряжений I и II рода (рис. 3).

В ее основу положена модель СМП, в главной секущей плоскости (рис. 3, а) и в плоскости пластины (рис. 3, б), построенная для расчетов напряжений I рода ($\sigma_{\Gamma\Gamma}$, $\sigma_{\Phi\Gamma}$, $\sigma_{\Theta\Gamma}$) методом конечных элементов, в которой учтены конструктивные и геометрические параметры пластины, их температурно-силовое нагружение в процессе резания в виде нормальных, касательных контактных напряжений и температур по передней и задней

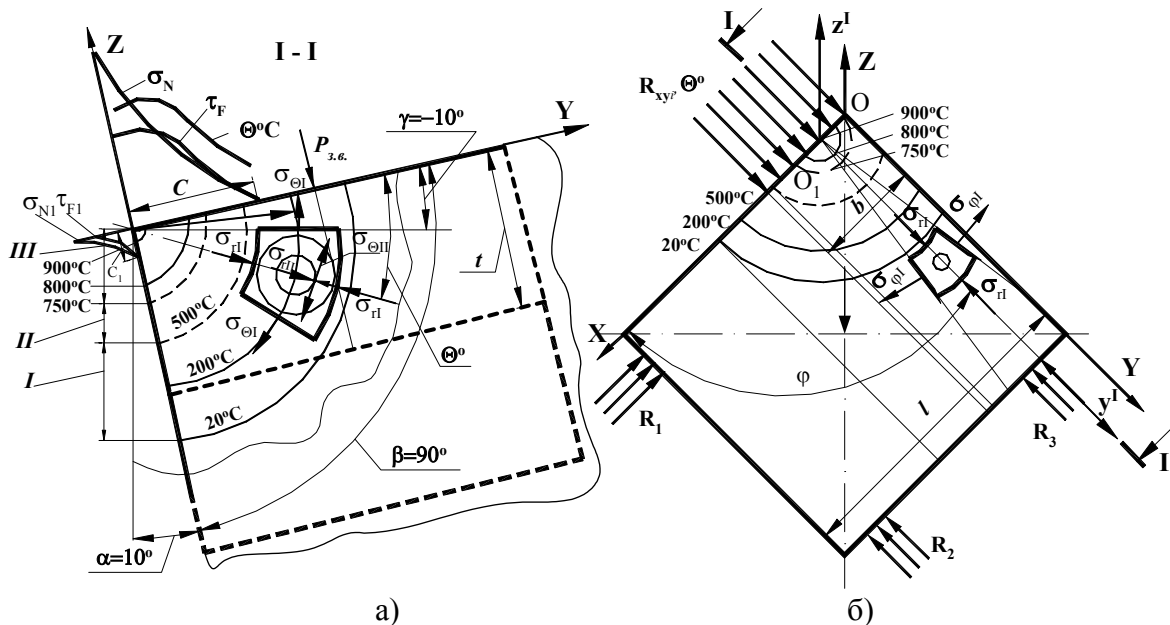


Рис. 3. Расчетная модель напряженно-деформированного состояния СМП:
а – в главной секущей плоскости; б – в плоскости пластины

поверхностям пластины. На модель наложены рассчитываемые методом

конечных элементов температурные поля, которые используются для определения состояния твердого сплава (I, II, III, IV) в расчетных узлах, а также напряжений II рода (σ_{II} , $\sigma_{\phi II}$, $\sigma_{\theta II}$) по выведенным формулам (1), (2), (3). При определении напряженного состояния в любом узле данной модели напряжения I и II рода, в соответствии с теорией Шпета, алгебраически суммируются:

$$\sigma_r \rightarrow \sigma_{rI} + \sigma_{rII}, \quad \sigma_\phi \rightarrow \sigma_{\phi I} + \sigma_{\phi II}, \quad \sigma_\theta \rightarrow \sigma_{\theta I} + \sigma_{\theta II}. \quad (4)$$

Физическая и математическая модели разрушения СМП из ИТС. На основании анализа поверхностей разрушения СМП сборных инструментов в производственных условиях была сформулирована гипотеза о возможности приблизительного описания характера разрушения режущих пластин из инструментальных твердых сплавов траекториями максимальных касательных напряжений, что соответствует теории разрушения структурно неоднородных материалов Писаренко-Лебедева. В качестве примера рассмотрена модель механики разрушения режущего клина СМП (рис. 4). Разрушение идет в 2 этапа. На первом этапе образуется система микротрещин в результате циклического нагружения режущих элементов из ИТС по траекториям максимальных касательных напряжений I семейства вдоль передней поверхности (рис. 4, б), определяемым из выражения: $\varphi = \alpha + \pi/4$, а на втором – происходит разрушение отрывом по этим же траекториям в направлении под углом 90° к направлению напряжений растяжения σ_1 , и сдвигом, при условии $\tau_{max} = \tau_{cd}$, – по траекториям τ_{max} II семейства, перпендикулярным первым и описываемым выражением: $\varphi + \pi/2$. Аналогично, траекториями τ_{max} описывается модель разрушения в плоскости пластины.

Траектории τ_{max} описываются и рассчитываются с помощью уравнений теории упругости и пластичности. Так, например, в главной секущей плоскости траектории τ_{max} и их значения определяются из выражений (рис. 4, б):

$$\frac{dz}{dy} = \operatorname{tg} \varphi; \quad \frac{dz}{dy} = -\operatorname{ctg} \varphi; \quad \operatorname{tg} 2\alpha = \frac{2\tau_{yz}}{\sigma_y - \sigma_z}; \quad \tau_{max} = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2},$$

а главные напряжения: $\sigma_1 = \sigma_0 + \tau_{max}$; $\sigma_3 = \sigma_0 - \tau_{max}$, где $\sigma_0 = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2}$.

В соответствии с критерием прочности Писаренко-Лебедева, для определения эквивалентных напряжений применяется следующее критериальное уравнение:

$$\sigma_\eta = \chi \sigma_i + (1 - \chi) \sigma_1 A^{1-I} \leq \sigma_\epsilon, \quad (5)$$

где $\chi = \frac{\sigma_\epsilon}{\sigma_{-6}}$; $I = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{\sigma_i}$; $A = 0,7 \div 0,8$.

Модели прочности и механики разрушения пластин из сплавов группы ВК с учетом их состояния во всем температурном диапазоне резания металлов. Проанализировав взаимосвязь диаграммы состояний твердого сплава ВК8 по зонам I, II, III, IV (рис. 4, а) с критерием прочности Писа-

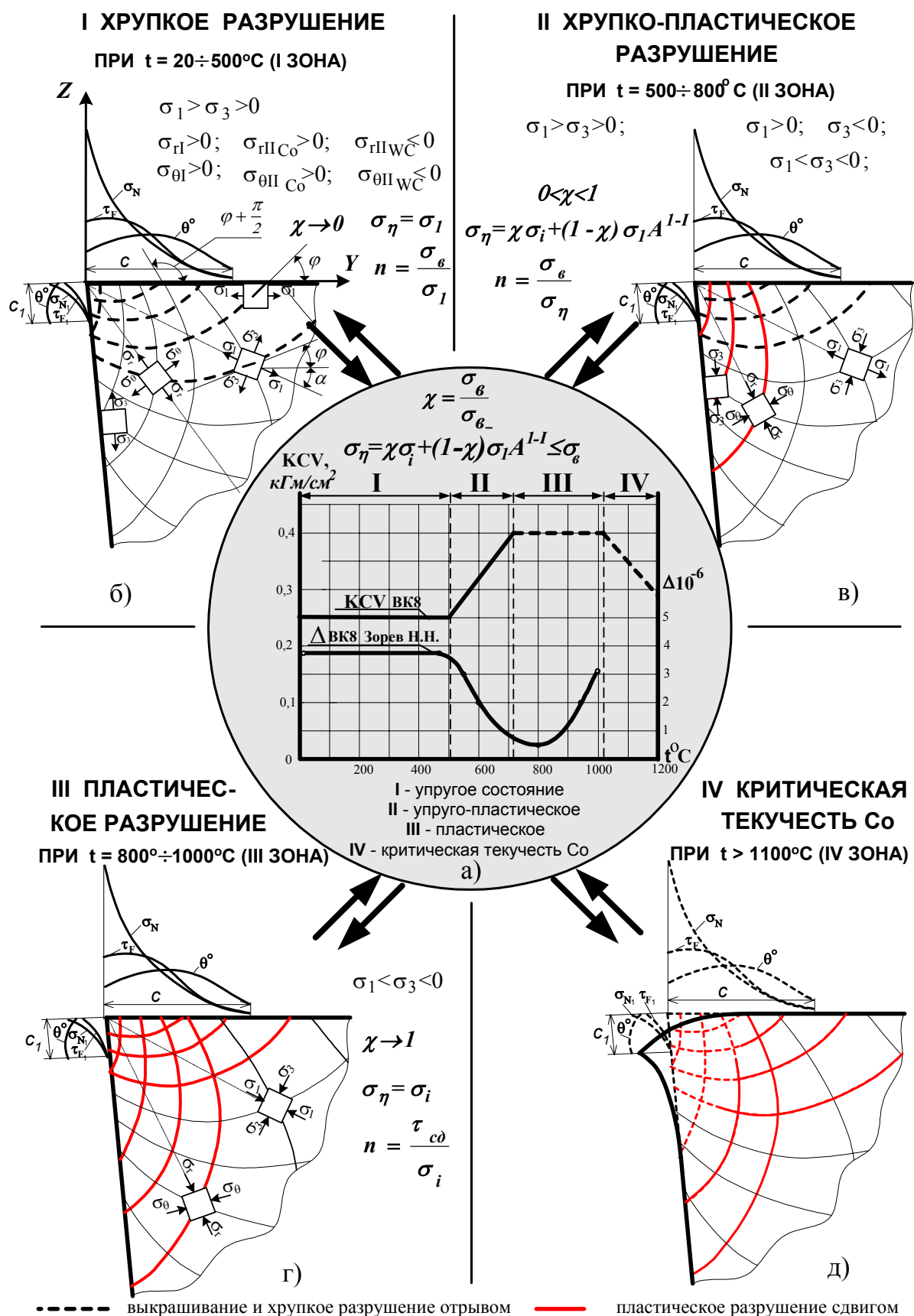


Рис. 4. Модели прочности и механики разрушения режущего клина СМП с учетом состояния ИТС

ренко-Лебедева на моделях разрушения СМП по траекториям максимальных касательных напряжений, получим следующие модели:

- I зона - упругое состояние в интервале температур от 20° до 470°С (рис. 4, б) – хрупкое разрушение происходит выкрашиванием и отрывом частиц твердого сплава вдоль передней и задней поверхностей ввиду пониженной его трещиностойкости и наличия напряжений II рода (по Н.Н. Зореву имеет место повышенный износ резца - рис. 4, а); при $\chi \rightarrow 0$ и $\sigma_\eta = \sigma_I$ выражение для определения коэффициента запаса прочности принимает вид $n = \sigma_\sigma / \sigma_I$;

- II зона - упругопластическое состояние в интервале температур от 470° до 725°С (рис. 4, в) – хрупко-пластическое разрушение происходит выкрашиванием и отрывом вдоль передней поверхности, и сдвигом вдоль задней поверхности (по Н.Н. Зореву износ резца резко уменьшается (рис. 4, а); при $0 < \chi < 1$ и $\sigma_\eta = \chi \sigma_i + (1 - \chi) \sigma_I A^{1-I}$ выражение для определения коэффициента запаса прочности принимает вид $n = \sigma_\sigma / \sigma_\eta$;

- III зона - пластическое состояние в интервале температур от 725°С до 1100°С (рис. 4, г) – пластическое разрушение происходит сдвигом вдоль передней и задней поверхностей (по Н.Н. Зореву износ резца снова растет - рис. 4, а); при $\chi \rightarrow 1$ и $\sigma_\eta = \sigma_i$ выражение для определения коэффициента запаса прочности принимает вид $n = \tau_{сд} / \sigma_i$;

- IV зона – состояние текучести кобальтовой связки при температуре больше 1100°С (рис. 4, д) – при критической текучести кобальтовой связки происходит потеря формоустойчивости вдоль передней и задней поверхностей (по Т.Н. Лоладзе для всех сплавов группы ВК - катастрофический износ).

Таким образом, разработанные модели прочности и механики разрушения пластин из ИТС с учетом их состояния хорошо коррелируют с результатами экспериментальных исследований особенностей износа и разрушения твердосплавных пластин резцов по Н.Н. Зореву и Т.Н. Лоладзе.

Для расчета напряжений и прочности режущих пластин из ИТС с учетом напряжений I и II рода, а также состояния ИТС и цикличности нагружения, разработан алгоритм, который положен в основу методологии (рис. 19).

В третьей главе описываются разработанные новый экспериментально-теоретический метод и установки на основе лазерной интерферометрии для исследования силовых и температурных деформаций и напряжений в режущем инструменте из ИТС на металлорежущих станках при реальных режимах резания, а также математическая модель, способ и устройство определения упругих постоянных Е и μ твердых сплавов.

Физическая суть разработанного метода сводится к измерению изменения толщины режущего элемента Δt в процессе резания как с зеркально отражающими поверхностями, которые получают после соответствующей механической обработки, так и из прозрачных материалов. В свою очередь, изменение толщины модели Δt связано со значением сумм главных напряжений $(\sigma_1 + \sigma_2)$ в точках плоской модели по закону Гука в пределах

$$\text{упругой деформации зависимостью: } \sigma_1 + \sigma_2 = -\frac{E}{\mu} \cdot \frac{\Delta t}{t}. \quad (6)$$

Разработанная математическая модель расчета составляющих напряжений σ_x , σ_y , τ_{xy} по суммам главных напряжений $S = (\sigma_1 + \sigma_2)$ сводится к решению известных из теории упругости дифференциальных уравнений второго порядка методом конечных разностей:

$$\frac{\partial^2 F}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 F}{\partial y^2} = S(x, y); \quad (7) \quad \frac{\partial^2 S}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 S}{\partial y^2} = 0. \quad (8)$$

$$\sigma_x = \frac{\partial^2 F}{\partial y^2}; \quad \sigma_y = \frac{\partial^2 F}{\partial x^2}; \quad \tau_{xy} = -\frac{\partial^2 F}{\partial x \partial y}. \quad (9)$$

Расписывая уравнения (7) и (8) в форме конечных разностей для сечения, параллельного оси Y , можно получить следующее выражение для расчета составляющего напряжения σ_y со свободного контура вдоль расчетного сечения K в точке $(i+1)$:

$$(\sigma_y)_{i+1,k} = (\sigma_y)_{i-1,k} + i(b_{0,k} + b_{i,k}), \quad (10)$$

где
$$b_{i,k} = S_{i,k+1} - 2S_{i,k} + S_{i,k-1} = h^2 \left(\frac{\partial^2 S}{\partial x^2} \right).$$

Составляющую напряжений σ_x определяем из соотношения:

$$(\sigma_x)_{i,k} = S_{i,k} - (\sigma_y)_{i,k}. \quad (11)$$

Для определения значения τ_{xy} в точках $i=1, 2, 3, \dots, n$ в сечении k необходимо определить σ_x по формуле (11) в точках сечений $(k+1)$ и $(k-1)$

и затем τ_{xy} из выражения:
$$(\tau_{xy})_{i,k} = \tau_{xy0} - \frac{1}{2} \sum_{m=0}^i [(\sigma_x)_{m,k+1} - (\sigma_x)_{m,k-1}], \quad (12)$$

которое выводится из уравнения условия равновесия
$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0. \quad (13)$$

Проверка разработанных математических моделей расчета составляющих напряжений σ_x , σ_y , τ_{xy} путем сравнения результатов, полученных на модели клина по выведенным выражениям и формулам теории упругости, численным методом и экспериментально - поляризационно-оптическим, показала, что изложенный метод расчета, реализованный на ПЭВМ, позволяет определять с требуемой точностью

составляющие напряжения σ_x , σ_y , τ_{xy} по суммам главных напряжений $S=(\sigma_1+\sigma_2)$, которые могут быть получены интерферометрическим методом.

Исследование НДС режущих пластин инструментов при резании было проведено на интерферометрической установке, которая монтируется на токарный станок модели 163 (рис. 5) [2], [8]. При скоростной киносъемке интерференционных картин получаем кинограммы, позволяющие определить действительное изменение толщины режущей части инструмента Δt , а затем по уравнениям (6), (9), (10), (11) рассчитываем составляющие напряжения.

Тестовые эпюры контактных напряжений на передней поверхности режущего клина инструмента при резании, полученные экспериментально поляризационно-оптическим и разработанным интерферометрическим методами, доказали достоверность результатов, получаемых разработанным интерферометрическим методом (погрешность меньше 10%).

Для определения сумм главных напряжений из выражения (6) необходимо знать модуль продольной упругости E и коэффициент Пуассона μ . На основе лазерной интерферометрии были разработаны способ и устройство (рис. 6) для определения этих упругих постоянных твердых сплавов. Они вычисляются по разработанным моделям:

$$E = \frac{2}{a} \cdot \frac{P \cdot l}{bn\lambda}; \quad \mu = \frac{2 \cdot l}{b} \cdot \frac{m}{n},$$

где P - сила; n , m - числа интерференционных линий продольной и поперечной деформаций; a - толщина образца; l , b - длина и ширина образца; λ - длина волны излучения.

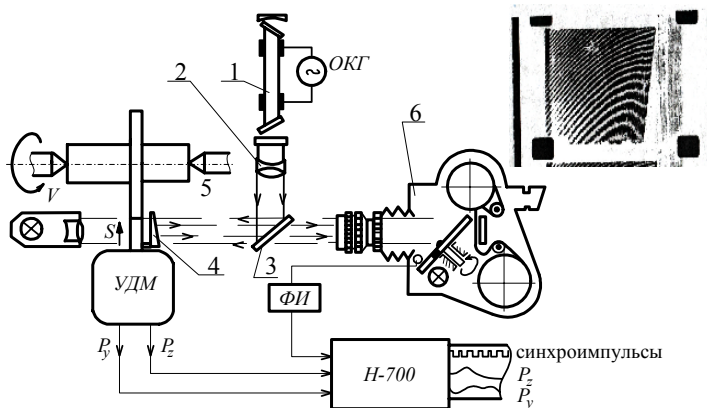


Рис. 5. Схема интерферометрической установки (а.с. № 1173179, пат. РФ. № 2086914) (1-лазер, 2-коллиматор, 3-полужеркало, 4-оптический клин, 5-резец, 6- кинокамера)

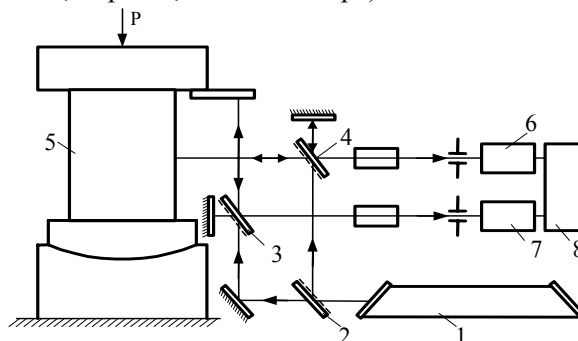


Рис. 6. Схема устройства для определения упругих постоянных E и μ (пат. РФ. № 1744445, № 2023252) (1-лазер, 2,3,4-полужеркала, 5-образец, 6,7-фотоприемники, 8-электронный счетчик)

Температурные поля в режущей части инструмента определяются по интерферограммам в процессе резания и сразу после быстрого вывода инструмента из зоны резания, и последующего остывания путем графического вычитания соответствующих эпюр. По разработанной методике, по картинам интерференционных линий строятся поля изотерм, которые хорошо коррелируют с результатами исследований А.Н. Резникова, М.Ф. Полетика, В.Н. Козлова. Знание температурных полей позволяет проводить расчет НДС пластин с учетом напряжений I и II рода и состояния ИТС.

Таким образом, разработан экспериментально-теоретический метод определения деформаций и напряжений в режущих пластинах из ИТС сборных инструментов с требуемой точностью для инженерных расчетов.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований напряженно-деформированного состояния СМП сборных инструментов.

Изучено влияние кинематики и цикличности процесса резания, толщины среза, схем базирования и крепления, типа, формы пластин на их НДС как в плоскости пластины, так и в плоскости схода стружки. В начале работы была проведена динамометрия сил резания при точении конструкционной стали 45 и жаропрочных сплавов 1Х12Н2ВМФ, ЭП33, ЖСКП, ХН60МВТЮ резцами с пластинами разных типов и форм.

Исследование НДС режущего клина в плоскости схода стружки. Экспериментально были получены уравнения распределения нормальных и касательных контактных напряжений на соответствующих поверхностях режущей части инструмента:

$$\text{передней - } \sigma_N = \sigma_M \cdot e^{n_x}; \quad (14) \qquad \tau_F = \tau_M \cdot e^{c_x^2}; \quad (15)$$

$$\text{задней - } \sigma_{N1} = \sigma_{M1} \cdot e^{n_1 x}; \quad (16) \qquad \tau_{F1} = \tau_{M1} \cdot e^{n_2 x}. \quad (17)$$

Выведены зависимости между максимальными и средними значениями контактных напряжений:

$$\sigma_M = 4 \cdot \sigma_{Ncp}; \qquad \tau_M = 2 \cdot \tau_{Fcp}. \quad (18)$$

Исследование влияния кинематики процесса резания на НДС показало, что при резании врезанием при малых толщинах среза наиболее напряженной является режущая кромка. При увеличении толщины среза с ростом максимальных значений напряжений у режущей кромки растут напряжения растяжения и во второй опасной точке за пределами длины контакта при одновременном приближении этой точки к режущей кромке. На основании изложенного, расчет на прочность режущей части инструментов, работающих при переменных толщинах среза, следует проводить для этих двух точек, наиболее опасных с точки зрения прочности (рис. 7, а). При резании с постоянными толщинами среза наиболее опасной зоной с точки зрения прочности является зона по

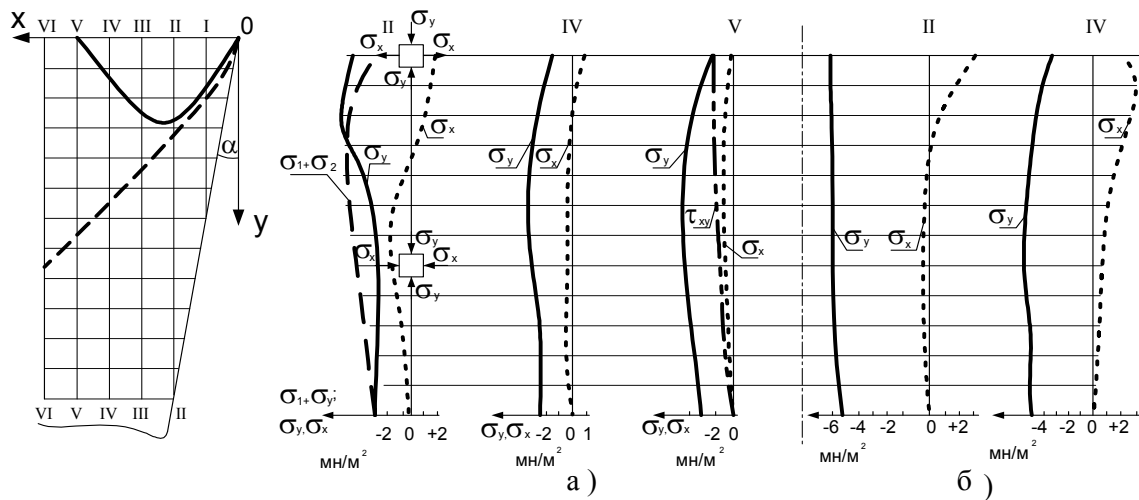


Рис. 7. Распределение напряжений в режущем клине:
а – при резании врезанием ($a = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$); б – при резании с $a = \text{const}$ ($a = 0,1 \cdot 10^{-3} \text{ м}$)
передней грани у режущей кромки (зона между пунктирной линией и передней гранью) (рис. 7, б). Таким образом, резание врезанием является более благоприятным видом резания с точки зрения напряженного состояния, чем резание при постоянных толщинах среза.

Анализ приведенных на рис. 8 зависимостей показал, что на передней поверхности пластины действуют растягивающие напряжения $\sigma_{1\text{max}}$, а на задней - сжимающие. Установлено, что при приложении вертикальной составляющей силы крепления P_v по нормали к передней поверхности пластины уровень растягивающих напряжений на передней поверхности пластины снижается в 1.2-1.3 раза, а на задней поверхности - в 1.1-1.2 раза. Значения напряжений на передней поверхности в пластинах с углом заострения $\beta = 70^\circ$

больше, чем в пластинах с углом заострения $\beta=90^\circ$ в 1.3-1.4 раза, на задней поверхности - в 1.15-1.2 раза (рис. 8). С увеличением угла $\nu_2=\arctg R_{xy}/P_z$ растягивающие напряжения на передней грани уменьшаются и постепенно переходят в сжимающие. Оптимальным является напряженное состояние, когда сила резания направлена по биссектрисе угла режущего клина [2].

Исследование НДС в плоскости СМП. При определении напряжений учитывались следующие параметры: угол ε при вершине СМП; главный угол в плане φ ; угол $\nu_1=\arctg R_{xy}/P_x$; схема крепления СМП.

Впервые экспериментально выявлено, что опасными, с точки зрения прочности, являются напряжения растяжения на главной и сжатия на вспомогательной режущих кромках (рис. 9). Установлено, что самый низкий уровень напряжений в 5-гранных пластинах, а самый высокий - в 3-гранных правильной формы. Напряжения растяжения на главной режущей кромке уменьшаются и переходят в сжимающие по мере приближения вектора силы R_{xy} к биссектрисе угла ε СМП.

Циклический характер нагружения СМП в процессе резания. Динамометрические исследования процесса резания жаропрочных сплавов резцами с

пластинами из ИТС (γ от -20° до 25°) с одновременной скоростной киносъемкой интерференционных полей режущей части инструмента показали цикличность характера их нагружения и НДС при всех видах стружкообразования: элементной, суставчатой, сливной.

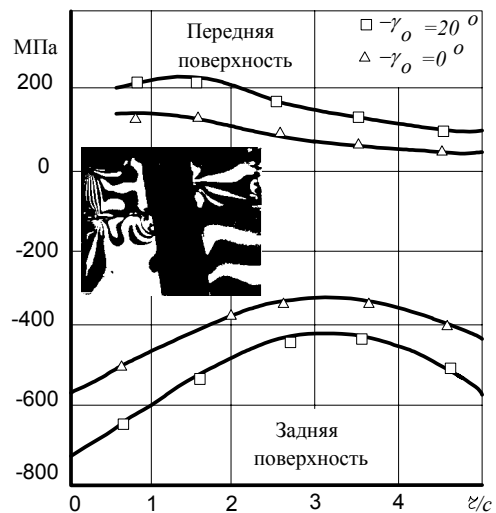


Рис. 8. Распределение напряжений на передней и задней поверхностях пластины (XH60MBTЮ, $V=0,17$ м/с, $S=0,34$ мм/об, $t=2$ мм)

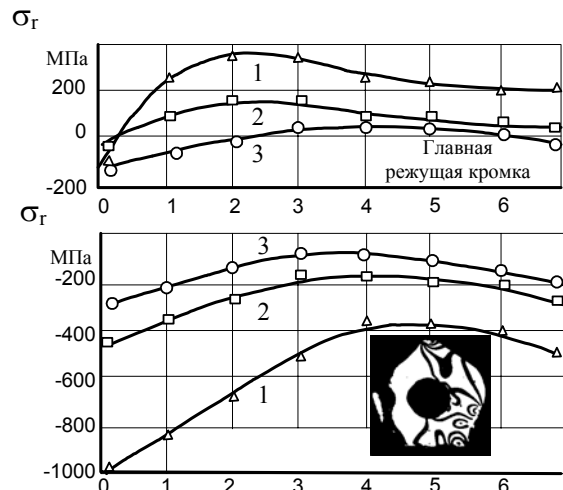


Рис. 9. Распределение напряжений на главной и вспомогательной режущих кромках СМП разных форм (сталь XH60MBTЮ, $V=0,17$ м/с, $t=2$ мм, $\varphi=60^\circ$, $S=0,34$ мм/об, $\alpha=10^\circ$): 1-3^х-гранная; 2-4^х-гранная; 3-5^х-гранная

В результате анализа полученных результатов выявлена прямая связь характера распределения напряжений со сдвиговым процессом в зоне резания, при этом характер распределения и величина главных напряжений существенно изменяется в течение одного цикла. Так, изменения главных напряжений у вершины в течение цикла составляют до шести раз. Установлено, что в течение всего цикла при изменении нагрузки от наибольшей $R_{\max}$ до наименьшей $R_{\min}$ вдоль передней поверхности имеется две опасные зоны с напряжениями растяжения σ_1 : первая расположена в пределах длины контакта C , вторая – на расстоянии более двух длин контакта $2C$, а вдоль задней поверхности – напряжения сжатия (рис. 10) [18]. Наиболее опасной является зона на передней поверхности у режущей кромки, где при наибольшей нагрузке $R_{\max}$ коэффициент запаса прочности $K_{\text{зп}}$ принимает значения меньше единицы (при $\gamma=25^\circ$ и $\gamma=-5^\circ$). При этом изменение эквивалентных напряжений $\sigma_{\text{н}}$ в указанной зоне в течение цикла достигает 5 раз (при $\gamma=25^\circ$). Все это, совместно с циклическим характером напряженного состояния, приводит к зарождению и развитию микротрещин, способствующих разрушению режущей части инструмента.

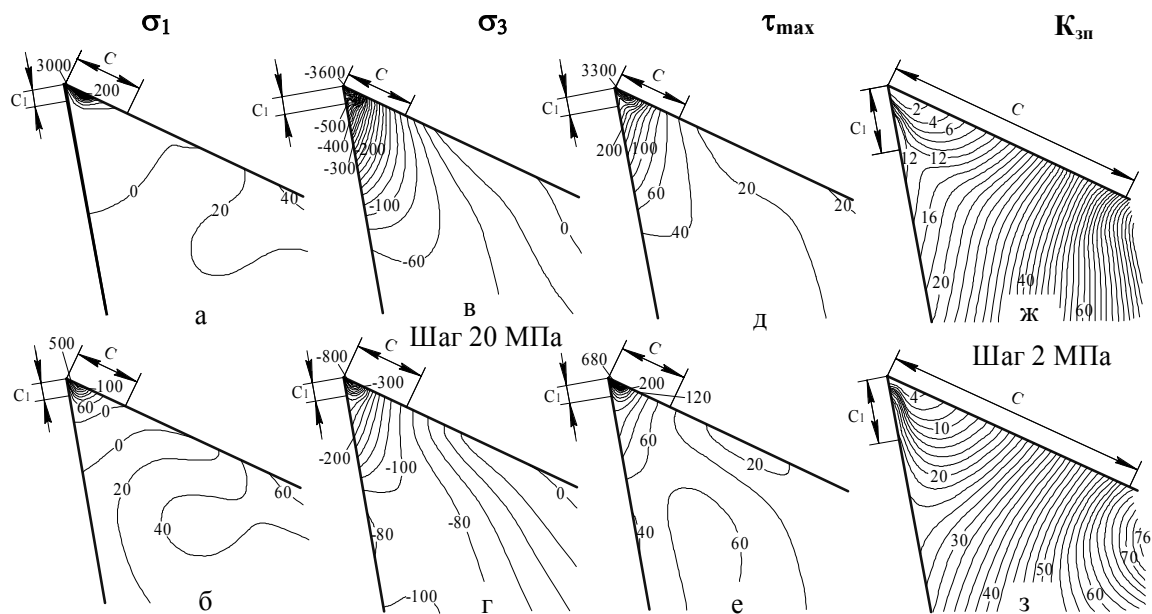


Рис. 10. Поля изолиний главных напряжений σ_1 , σ_3 , максимальных касательных $\tau_{\max}$ и коэффициентов запаса прочности $K_{\text{зп}}$ ($\gamma=25^\circ$): а, в, д, ж - $R_{\max}$; б, г, е, з - $R_{\min}$

Экспериментальные результаты, полученные в 4^й главе, используются далее в работе в качестве исходных данных для формирования граничных условий на контуре пластин при численных исследованиях НДС СМП, а также для оценки достоверности результатов напряжений и деформаций, получаемых расчетным путем.

В пятой главе изложены результаты численного исследования напряжений I рода методом конечных элементов, проведенного по моделям, разработанным во 2^й главе (см. рис. 2), с использованием программных комплексов DAST и Cosmos. Расчетным путем установлены закономерности

влияния конструктивных и геометрических параметров СМП на их НДС и прочность, выявлены опасные зоны пластин, определяемые как напряжения I рода, так и суммарными (с учетом напряжений II рода). Достоверность полученных результатов доказана их сравнением с экспериментальными данными, представленными в 4^й главе, а также статистикой разрушения пластин из твердых сплавов.

Анализ полученных картин изолиний напряжений σ_1 и σ_2 в плоскости пластины свидетельствует о том, что для СМП любых форм и типоразмеров, при различных схемах их базирования и крепления в корпусе инструмента, а также при разных условиях резания опасными являются напряжения растяжения $\sigma_{1\max}$ на главной и сжатия $\sigma_{2\max}$ на вспомогательной режущих кромках, а зоны максимальных растягивающих напряжений расположены от вершины на расстоянии, равном $1/4 \div 1/5$ длины пластины (рис. 11) [3].

Результаты численных исследований показали, что из всего многообразия конструктивных параметров СМП наибольшее влияние на НДС пластин оказывают их формы, схемы базирования и крепления. Схема базирования СМП по опорной и двум боковым поверхностям при креплении механизмом рычажного типа обеспечивает минимальные значения опасных напряжений растяжения σ_1 , отличающихся от других схем в 2 и более раза.

С увеличением угла ϵ при вершине СМП напряжения растяжения σ_1 на главной (рис. 11) и сжатия σ_2 на вспомогательной режущих кромках уменьшаются, что подтверждается экспериментальными данными (погрешность меньше 7%).

С целью снижения опасных напряжений растяжения были разработаны пластины, формы которых отличаются от стандартных многогранных увеличением угла при вершине ϵ за счет выполнения боковых граней по цилиндрической и конической поверхностям на всю длину и на половину длины стороны базового многогранника, на которые получен патент РФ [32]. Максимальные напряжения растяжения $\sigma_{1\max}$ на главной режущей кромке новых пластин уменьшаются в 5 и более

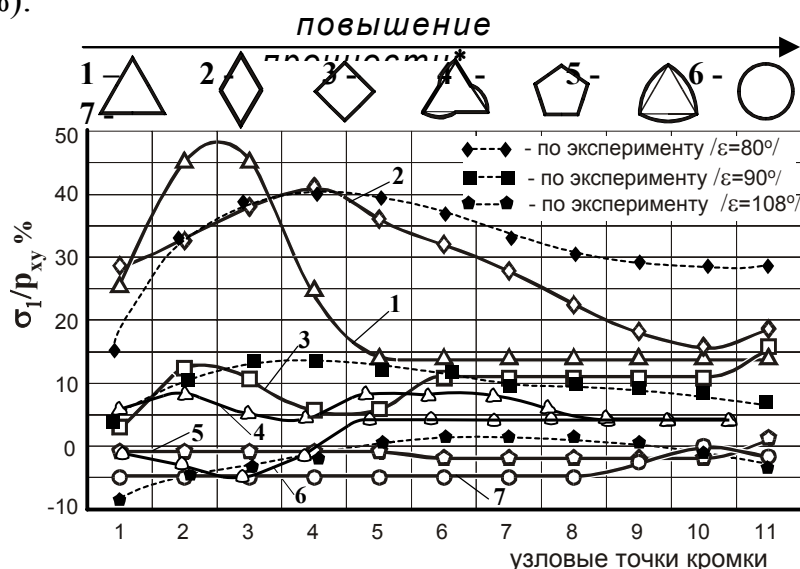


Рис. 11. Распределение напряжений σ_1 на главных режущих кромках СМП разных форм (ХН60МВТЮ; ВК8; $\varphi=45^\circ$; $t=2\text{мм}$; $S=0,34\text{мм/об}$; $V=0,2\text{м/с}$)
* - пластина новой формы (Пат. РФ № 2201316)

раз в зависимости от формы по сравнению со стандартными многогранными.

На основании результатов исследований стандартные СМП были расставлены в ряд по прочности в сторону ее увеличения в следующей последовательности: 3^х-гранные, ромбические, 4^х-гранные, 5^{ти}-гранные, круглые. Соответствующее место заняли пластины новых форм ($\epsilon=90^\circ$, $\epsilon=120^\circ$) (рис. 11).

Исследование влияния геометрических параметров и условий нагружения СМП на их НДС в плоскости схода стружки проводились для пластин с разными передними и задними углами, формами передней поверхности, фасками износа и режимами резания, широко применяемыми при обработке деталей из труднообрабатываемых материалов. Анализ полученных результатов показал, что напряжения растяжения расположены на передней поверхности в пределах длины контакта, а определяемые ими опасные зоны находятся на расстоянии, приблизительно равном $1/3 \div 1/4$ длины контакта C от вершины, а по эксперименту – $1/4C$ (рис. 12) (погрешность расчета $5 \div 7\%$). Влияние переднего γ , заднего α углов и направления равнодействующей силы резания v_2 на НДС режущего клина необходимо рассматривать совместно, так как они определяют угол ψ отклонения направления равнодействующей силы от биссектрисы угла заострения β режущего клина. С уменьшением угла ψ снижаются опасные напряжения растяжения и при $\psi=0^\circ$ имеют минимальные значения.

Анализ НДС СМП с разной формой передней поверхности показал, что эпюры распределения главных напряжений σ_1 и σ_3 для режущего клина с фаской и с вогнутой передней поверхностью совпадают и примерно в 3 раза меньше по сравнению с главными напряжениями в режущем клине с плоской передней поверхностью.

Исследование влияния изменения фаски износа по задней поверхности (в интервале $f_3=0 \div 1$ мм) на НДС режущей части инструмента показало,

что по мере приближения рассматриваемой точки по передней поверхности к вершине напряжения σ_1 уменьшаются, и наступает момент, когда они становятся отрицательными и переходят в напряжения сжатия, т.е. возникают условия всестороннего сжатия. С увеличением фаски износа в исследованном диапазоне напряжения σ_1 вдоль передней поверхности и σ_3 вдоль задней поверхности

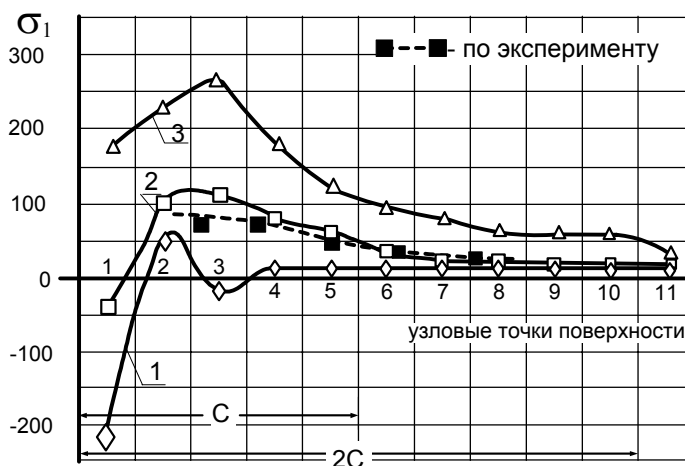


Рис. 12. Распределение напряжений σ_1 на передней поверхности режущего клина (ХН60МВТЮ; ВК8; $\gamma=0^\circ$; $\alpha=10^\circ$; $t=2$ мм; $S=0,34$ мм/об; $V=0,2$ м/с):

1 - $v_2 = 45^\circ$; 2 - $v_2 = 30^\circ$; 3 - $v_2 = 15^\circ$

уменьшаются, что хорошо согласуется с результатами экспериментальных исследований М.Ф. Полетика, В.В. Мелихова, В.Н. Козлова.

По результатам напряжений I рода и закономерностям их распределения, полученным в 4^й и 5^й главах, согласно разработанной во 2^й главе модели НДС СМП с учетом напряжений I и II рода, построены типовые эпюры напряженного состояния пластин в опасных зонах: на главной режущей кромке и на передней поверхности в главной секущей плоскости. Суммарные опасные напряжения растяжения $\sigma_{\text{общ}} = \sigma_{\text{rI}} + \sigma_{\text{rII}}$ на главной режущей кромке находятся примерно на расстоянии $\frac{1}{2}$ ее длины от вершины (рис. 13, а), а по передней поверхности – на расстоянии больше двух длин контакта С от вершины (рис. 13, б), что хорошо подтверждается характером разрушения СМП в производственных условиях (рис. 14, а).

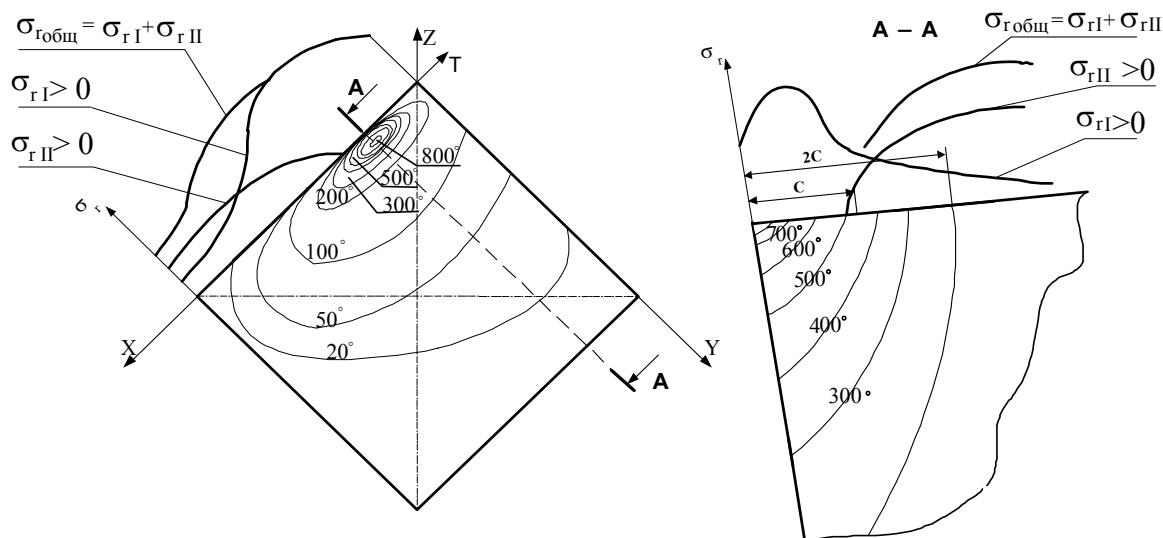
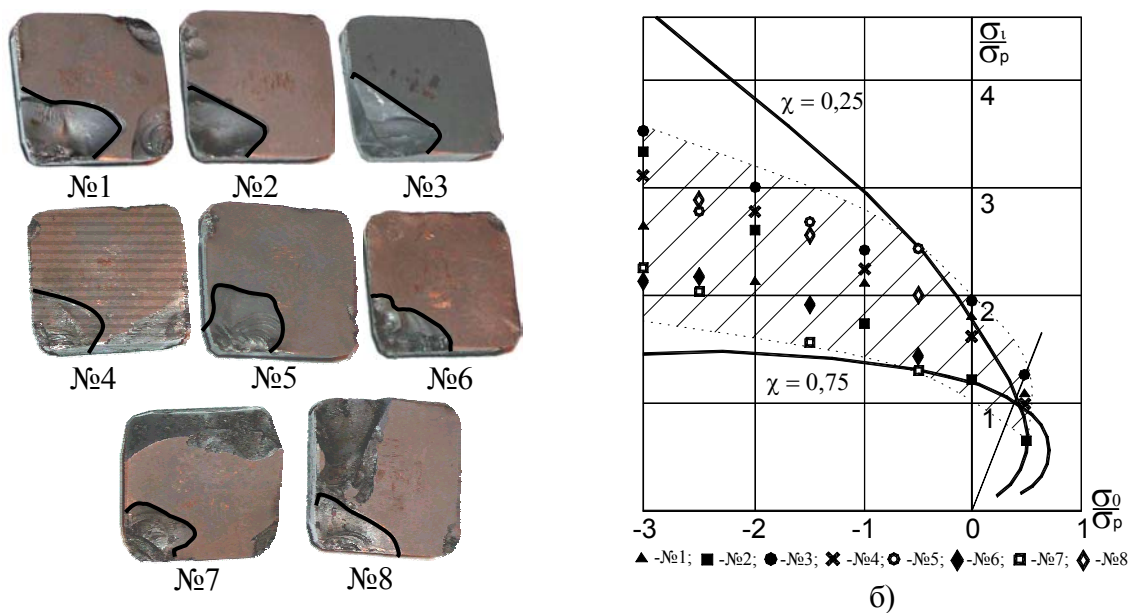


Рис. 13. Типовые эпюры напряженного состояния СМП из ИТС в опасных зонах с учетом напряжений I и II рода: а) в плоскости пластины; б) в режущем клине



а)

Рис. 14. Характер разрушения 4^х-гранных СМП: а) на образцах разрушенных пластин (фрезерование; ВК8); б) на поле, описанном предельными кривыми напряжений по критерию Писаренко-Лебедева ($A=0,75$; $\chi=0,25 \div 0,75$)

Результаты статистических данных разрушения СМП из твердого сплава ВК8 торцевой фрезы вписались в поле, ограниченное предельными кривыми прочностных напряжений для СМП из твердых сплавов по критерию Писаренко-Лебедева (5) с вероятностью разрушения $A=0,75$ при χ в интервале $0,25 \div 0,75$ (рис. 14, б). Это доказывает достоверность результатов НДС и прочности СМП, полученных численным методом конечных элементов, правомочность применения теории механики разрушения и прочности Писаренко-Лебедева для СМП из ИТС и дает возможность использовать разработанные модели СМП для инженерного расчета НДС и прочности пластин.

В шестой главе доказывается взаимосвязь механических характеристик ИТС с прочностью и работоспособностью СМП во всем температурном диапазоне резания металлов на основе результатов испытаний механических характеристик инструментальных твердых сплавов (ИТС) при температурно-силовом воздействии и экспериментальных исследований стойкости, а также представлены разработанные способы определения температуры максимальной работоспособности $\theta_{м.р.}$.

На основании экспериментальных исследований были построены зависимости изменения ударной вязкости KCV и логарифма твердости по Виккерсу $\lg HV$ для сплавов группы ВК от температуры во всем температурном диапазоне, характерном для резания металлов [31], [34]. Из полученных зависимостей $KCV=f(\theta)$ (рис. 15) следует, что изменение коэффициента ударной вязкости описывается графиком четырех линейных участков, соединяющихся в точках перегиба, которые находятся для сплавов группы ВК на соответствующих прямых линиях ab, cd, ef. Эти линии разделяют состояние твер-

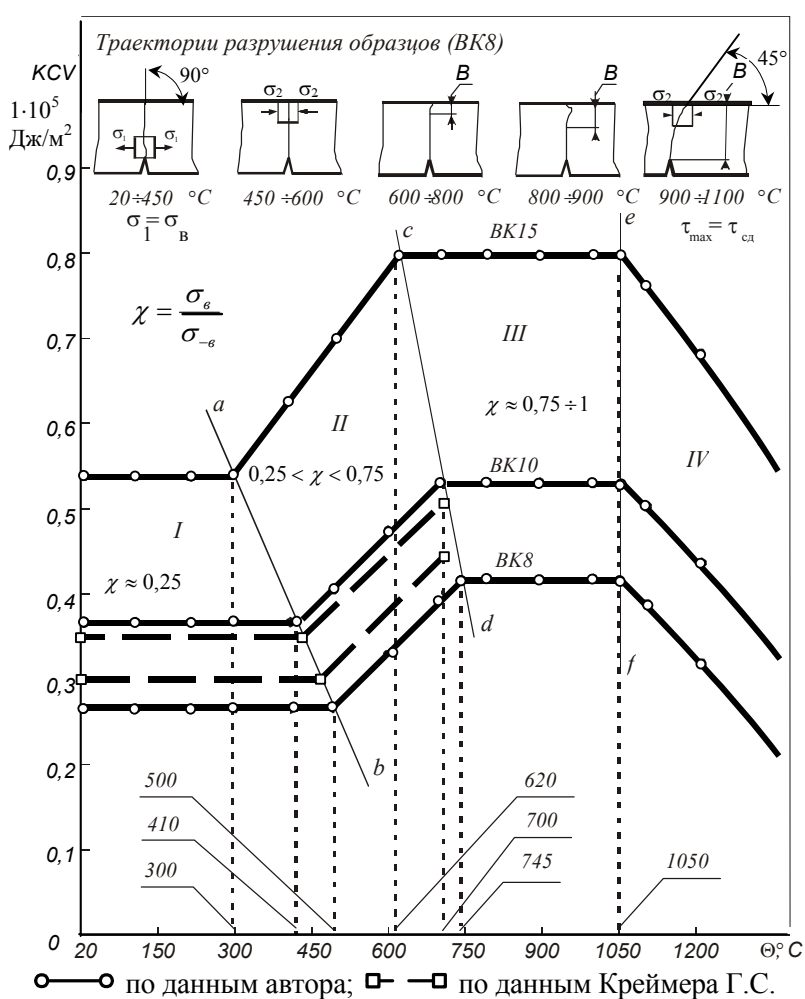


Рис. 15. Зависимость ударной вязкости сплавов группы ВК от температуры (реш. о выдаче Пат. РФ по заяв. № 2001135677)

трещиностойкости $\theta_{м.тр.}$, инструментального коэффициента $K_{и}$ и оптимальной скорости резания V_0 .

дого сплава в зависимости от температуры на четыре зоны: I-упругое, II-упруго- пластическое, III-пластическое, IV-текучести кобальтовой связки.

Анализ фрактограм изломов твердосплавных образцов показал, что в I зоне диаграммы имеет место хрупкое разрушение, во II зоне – хрупко-пластическое, в III зоне – пластическое, в IV зоне – текучесть кобальтовой связки. Переход от хрупкого к пластическому разрушению подтверждается также траекториями поверхностей разрушения образцов, приведенных на рис. 15.

Линия разрыва до температуры 600°C расположена перпендикулярно к поверхности образца, что подтверждает преобладание хрупкого разрушения, а при температуре более 800°C - стремится к углу 45° к поверхности образца, что подтверждает появление зоны пластического разрушения сдвигом в твердых сплавах по траектории максимальных касательных напряжений, а в интервале от 600°C до 800°C хрупкопластическое разрушение. Таким образом, были доказаны первая и вторая гипотезы.

Из полученных экспериментально зависимостей логарифма твердости по Виккерсу твердых сплавов группы ВК от температуры $\lg HV=f(\theta^{\circ})$ следует, что они описываются графиком двух линейных участков, соединяющихся в точке перегиба, находящихся на прямой c_1d_1 , которая разделила состояние сплавов на упругопластическое и пластическое (рис. 16).

Экспериментальное доказательство третьей гипотезы было проведено путем построения зависимостей относительного поверхностного износа резцов с пластинами из сплава ВК8 при обработке деталей из сплавов II, III,

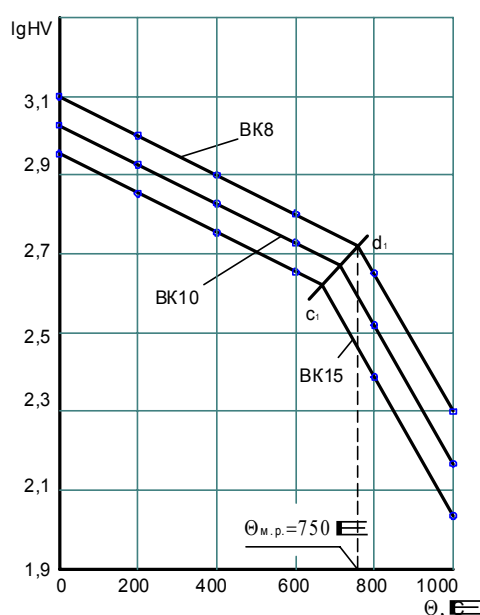


Рис. 16. Зависимость логарифма твердости сплавов группы ВК от температуры (Пат. РФ №2173611)

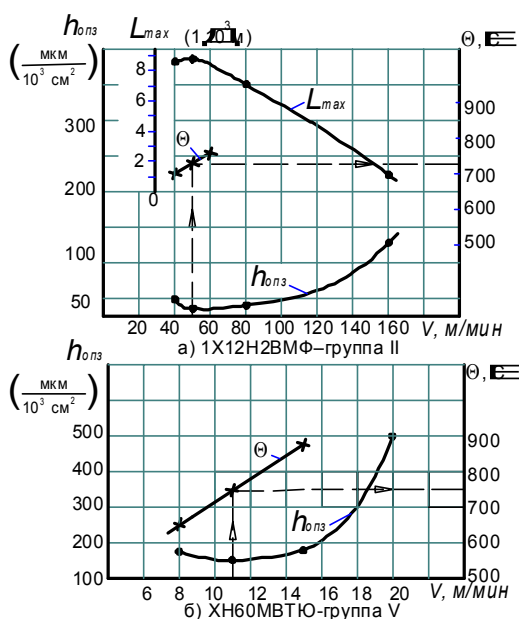


Рис. 17. Зависимости относительного износа, пути резания и температуры от скорости резания (BK8, $S=0,1\text{ мм/об}$, $t=1\text{ мм}$; $\gamma=0^{\circ}$; $\alpha=8^{\circ}$)

IV, V групп обрабатываемости с одновременным измерением температуры резания методом естественной термопары (рис. 17). Сравнение температуры максимальной работоспособности $\Theta_{м.р.}$ для сплава ВК8, при которой на графике логарифма твердости по Виккерсу (рис. 16) имеет место точка перегиба, и

температуры резания, определенной при оптимальной скорости резания пластиной из ВК8 для разных групп обрабатываемых материалов (рис. 17) с применением метода естественной термопары, показало хорошее совпадение (ИТС - ВК8 - $\Theta_{м.р.}=750^{\circ}\text{C}$; 1Х12НВМФ - $\Theta=730^{\circ}\text{C}$; ХН60МВТЮ - $\Theta_{м.р.}=750^{\circ}\text{C}$; 1Х17Н2 - $\Theta_{м.р.}=730^{\circ}\text{C}$; ЭП33ВД - $\Theta_{м.р.}=750^{\circ}\text{C}$; погрешность меньше 5%). Таким образом, доказана третья гипотеза.

Анализ зависимостей ударной вязкости сплавов группы ВК во всем температурном диапазоне резания металлов показал (рис. 15), что температуры, при которых сплавы переходят из упруго-пластического в пластическое состояние, соответствуют температуре максимальной работоспособности (рис. 17). Это свидетельствует о том, что температуру максимальной работоспособности режущих пластин из твердых сплавов можно определять как по точке перегиба зависимости $\lg HV=f(\Theta)$, так и по второй точке перегиба ударной вязкости $KCV=f(\Theta)$.

На основании экспериментальных зависимостей ударной вязкости сплавов группы ВК при температурно-силовом воздействии (рис. 15) выведены формулы для определения следующих температур:

- максимальной трещиностойкости $\Theta_{м.тр.}=675^{\circ}\text{C}-K_{тр}\cdot[KCV]_{тр}$, (19)
где $K_{тр}$ - изменение температуры максимальной трещиностойкости на единицу ударной вязкости; $[KCV]_{тр}$ - значение ударной вязкости сплава при комнатной температуре ($20\div 25^{\circ}\text{C}$);

- максимальной работоспособности $\Theta_{м.р.}=875^{\circ}\text{C}-K_p\cdot[KCV]_p$, (20)
где K_p - изменение температуры максимальной работоспособности на единицу ударной вязкости; $[KCV]_p$ - значение ударной вязкости сплава при температуре в интервале $800\div 950^{\circ}\text{C}$.

В результате проведенных теоретических и экспериментальных исследований изменений механических характеристик ИТС, ударной вязкости KCV и логарифма твердости по Виккерсу $\lg HV$ от температуры для практического использования построена номограмма, позволяющая определять температуры максимальной трещиностойкости $\Theta_{м.тр.}$ и работоспособности $\Theta_{м.р.}$, инструментальный коэффициент $K_{и}$ (рис. 18). По левой ветви номограммы, построенной в координатах зависимости ударной вязкости KCV от температуры, определяем для твердых сплавов температуру максимальной трещиностойкости $\Theta_{м.тр.}$ и соответственно температуру предварительного подогрева. По правой ветви диаграммы, построенной в координатах зависимости логарифма твердости $\lg HV$ от температуры, определяем для твердых сплавов температуру максимальной

работоспособности $\theta_{м.р.}$ и инструментальный коэффициент коррекции скорости $K_{и}$ при смене инструментального материала.

Установлена эмпирическая зависимость для определения инструментального коэффициента $K_{и}$ ИТС по температуре максимальной работоспособности:

$$K_{и} = 0,0131 \cdot \theta_{м.р.} - 8,5723. \quad (21)$$

При изучении трещиностойкости твердых сплавов сравнение отношений коэффициентов интенсивности напряжений KI_c двух сплавов группы ВК с отношением их инструментальных коэффициентов $K_{и}$ показало их обратно пропорциональную зависимость. На основании этого получено выражение для определения инструментального коэффициента $K_{и2}$:

$$K_{и2} = \frac{K_{и1} \cdot KI_{c1}}{KI_{c2}}, \quad (22)$$

где KI_{c1} и KI_{c2} – коэффициенты интенсивности напряжений соответственно базового и определяемого твердого сплава, которые могут быть получены при лабораторных испытаниях на трещиностойкость.

Экспериментальная проверка четвертой гипотезы путем предварительного подогрева пластин из ИТС до температуры максимальной трещиностойкости, определенной, в соответствии со второй гипотезой, по первой точке перегиба зависимости ударной вязкости твердого сплава от температуры $KCV = f(\theta^\circ)$ (рис. 15), показала повышение стойкости на 25%. Разработана электромеханическая схема резца с предварительным подогревом режущей пластины, которая положена в основу способа повышения работоспособности инструмента. Таким образом, доказана четвертая гипотеза.

Для практического использования разработан экспресс-метод определения оптимальной скорости резания металлов твердосплавным

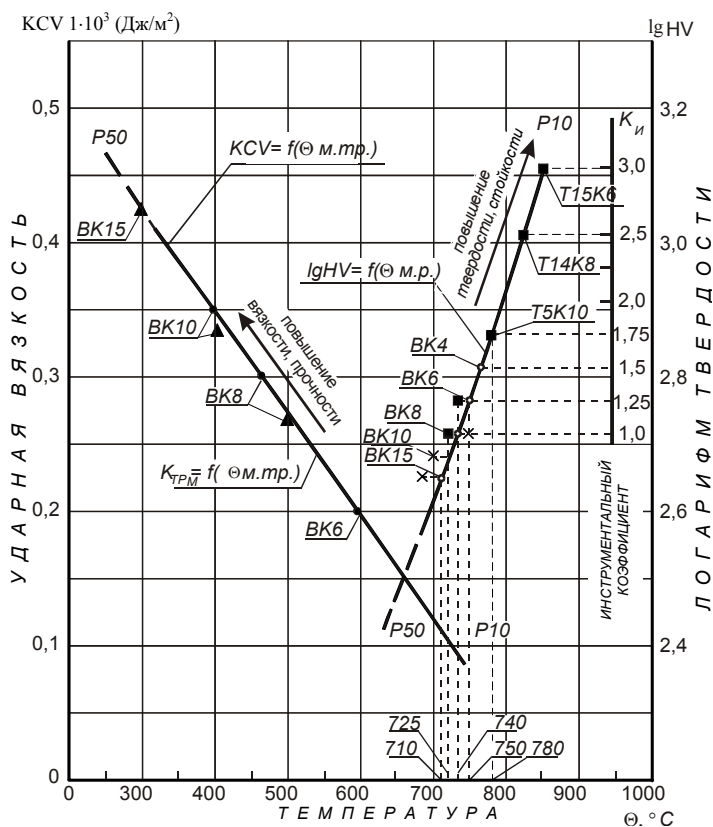


Рис. 18. Номограмма для определения температур максимальной работоспособности $\theta_{м.р.}$, трещиностойкости $\theta_{м.тр.}$ и инструментального коэффициента $K_{и}$ сплавов ВК и ТК (Заяв. на Пат. РФ № 2002111595)

- — $\theta_{м.р.}$ на основании стойкостных испытаний
- × — экспериментальная проверка $\theta_{м.р.} = f(lgHV)$
- ▲ — экспериментальная проверка $\theta_{м.тр.} = f(KCV)$

инструментом по температуре максимальной работоспособности ИТС – $\Theta^{\circ}_{\text{м.р.}}$, который заключается в определении $\Theta^{\circ}_{\text{м.р.}}$ по второй точке перегиба зависимости ударной вязкости данного твердого сплава от температуры $KCV = f(\Theta^{\circ})$ и последующем ее получении и поддержании при резании металлов, которое может быть достигнуто с помощью метода естественной термопары при непрерывном изменении скорости резания с применением бесступенчатого регулирования привода главного движения на станке с ЧПУ при постоянных остальных параметрах.

Таким образом, экспериментально доказаны выдвинутые гипотезы о наличии у каждого инструментального твердого сплава группы ВК характерных температур: максимальной трещиностойкости и максимальной работоспособности и разработаны способы их определения, защищенные патентами РФ на изобретения.

В седьмой главе изложена разработанная методология расчета, проектирования и эксплуатации СМП из твердых сплавов и сборных инструментов в условиях повышенной работоспособности, позволяющая осуществлять выбор и расчет конструктивных параметров, схем базирования и крепления СМП из ИТС сборных инструментов на основании прочностного подхода, а также обеспечивать условия их максимальной работоспособности. Приведены разработанные конструкции СМП повышенной прочности и сборных инструментов повышенной работоспособности.

В основу методологии положены теоретические положения о НДС, прочности и максимальной работоспособности СМП из ИТС, требования к разрабатываемым новым конструкциям пластин и сборных инструментов, сформулированные на основе экспериментальных и численных исследований методом конечных элементов, новая классификация схем базирования и крепления пластин, позволяющая выбрать схемы, обеспечивающие существенное снижение опасных напряжений растяжения. Блок-схема разработанной методологии приведена на рис. 19. Она сформирована из четырех основных этапов: задание исходных данных, формирование требований, проектирование, эксплуатация при условиях максимальной работоспособности.

На основании созданного метода расчета и проектирования СМП были разработаны конструкции пластин повышенной прочности с криволинейными режущими кромками на всю длину (рис. 20, а) и на половину длины пластины (рис. 20, б), на которые получен патент РФ №2201316.

С этими пластинами разработаны конструкции сборных резцов (рис. 21) и фрез (рис. 22). Производственные испытания и внедрение разработанных сборных резцов с новыми пластинами повышенной прочности показали увеличение количества обрабатываемых деталей одной

режущей кромкой, до поворота пластины, примерно в 3 раза (черновое точение, T15K6, 40X).

Инструменты с СМП правильной формы (рис. 23, 24) спроектированы с применением разработанной методологии, защищены авторскими свидетельствами и внедрены на семи предприятиях. Весь набор разработанных инструментов состоит из 15 наименований. Инструменты, испытанные и внедренные в производство, показали снижение частоты отказов из-за поломки в 3-4 раза и повышение их работоспособности на 20-25%.

Разработанные способы и устройства, защищенные патентами РФ, и РТМ позволили существенно сократить трудоемкость по определению и поддержанию условий максимальной работоспособности сборных инструментов с СМП из ИТС.

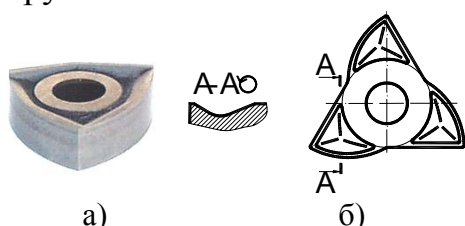


Рис. 20. Сменные пластины повышенной прочности (Пат. РФ №2201316)

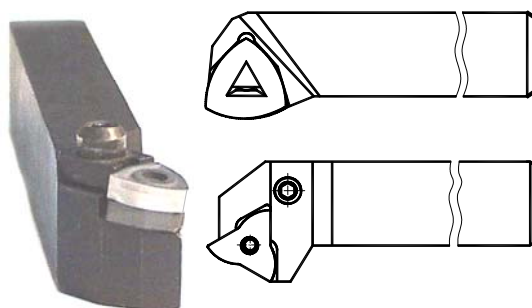


Рис. 21. Разработанные конструкции резцов с пластинами повышенной прочности

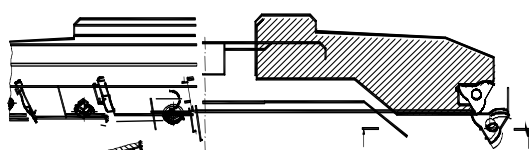


Рис. 22. Торцовая фреза с пластинами повышенной прочности

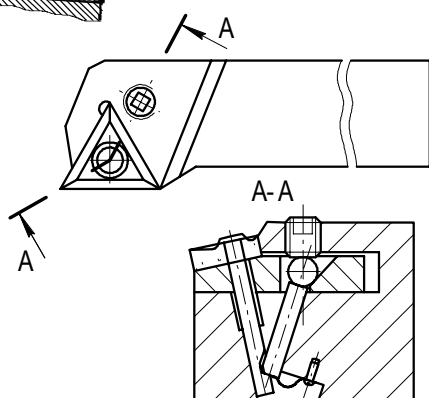


Рис. 23. Сборный резец (а.с. № 948546)

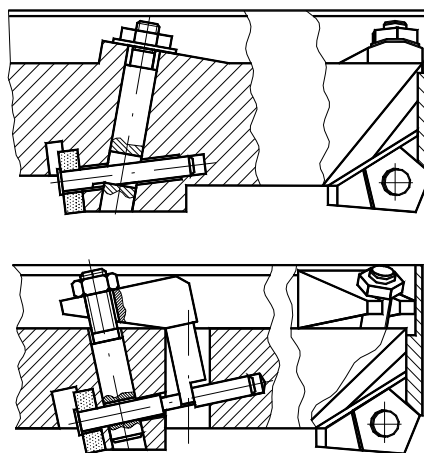


Рис. 24. Сборная торцовая фреза (а.с. № 1143526)

В заключении сформулированы основные выводы и результаты работы:

1. Впервые разработаны модели напряженно-деформированного состояния СМП из твердых сплавов, механики их разрушения, прочности и работоспособности с учетом напряжений I и II рода, цикличности

нагружения, состояния ИТС при резании: упругого, упругопластического, пластического и текучести кобальтовой связки.

2. Создан новый экспериментально-теоретический метод определения напряженно-деформированного состояния и температурных полей в режущих пластинах из ИТС при резании на основе лазерной интерферометрии, включающий способ и устройство измерения деформаций (А.С. № 1173179, Пат. РФ № 2086914), математическую модель расчета составляющих напряжений σ_x , σ_y , τ_{xy} по суммам главных напряжений ($\sigma_1 + \sigma_2$), способ и устройство определения модуля упругости E и коэффициента Пуассона μ ИТС (Пат. РФ № 1744445, № 2023252).

3. Впервые получены экспериментально, методом лазерной интерферометрии, и численным методом, с применением конечных элементов, закономерности распределения напряжений и деформаций в СМП из ИТС для различных конструктивных параметров пластин, схем базирования и крепления, условий силового и температурного нагружения, которые позволяют находить решения, обеспечивающие снижение опасных напряжений в режущих пластинах и соответствующее увеличение работоспособности сборных инструментов.

4. Впервые экспериментально, с применением разработанного метода лазерной интерферометрии, установлен циклический характер напряженно-деформированного состояния режущей части инструмента при разных видах стружкообразования, обусловленный периодическими сдвигами элементов обрабатываемого материала в плоскости сдвига, вскрывающий одну из причин развития трещин и усталостного хрупкого разрушения режущих элементов из ИТС.

5. Впервые установлены характерные температуры инструментальных твердых сплавов при температурно-силовом воздействии на них:

- максимальной трещиностойкости, определяемой по первой точке перегиба зависимости ударной вязкости (KCV) от температуры;

- максимальной работоспособности, определяемой по второй точке перегиба зависимости ударной вязкости (KCV) от температуры или по точке перегиба зависимости логарифма твердости по Виккерсу ($\lg HV$) от температуры.

6. На основании установленных характерных температур ИТС разработаны:

- экспресс-методы определения температуры максимальной работоспособности ИТС и оптимальной скорости резания (А.С. № 901844, № 1157601, Пат. РФ № 2173611, реш. о выдаче Пат. РФ по заяв. № 2001135677);

- номограмма для определения температур максимальной работоспособности, трещиностойкости и инструментального коэффициента ИТС;

- способ и устройство повышения работоспособности инструмента путем предварительного нагрева режущей пластины до температуры максимальной трещиностойкости ИТС (Пат. РФ № 2207936);

- РТМ по оптимизации режимов резания при обработке деталей из жаропрочных материалов.

7. Разработана научно-обоснованная методология расчета НДС, прочности СМП и определения условий эксплуатации пластин из ИТС, обеспечивающих максимальную работоспособность инструментов.

8. Разработаны новые сменные неперетачиваемые пластины повышенной прочности с криволинейной режущей кромкой (Пат. РФ №2201316) и сборные торцовые фрезы и резцы с их применением, производственные испытания и внедрение которых показало повышение работоспособности инструментов в 3 раза. Разработаны новые конструкции сборных инструментов повышенной работоспособности со сменными многогранными пластинами: резцы, зенкеры, торцовые и цилиндрические фрезы, протяжки (А.С. №№ 778940, 948546, 1143526), ряд из которых прошли испытания и внедрены в производство.

9. Новые технические и технологические решения, разработанные на основе проведенных в работе научных исследований, защищены 13 авторскими свидетельствами и патентами, внедрены на 9 предприятиях, в том числе оборонной промышленности, со значительным экономическим эффектом.

Основные научные результаты диссертации опубликованы в научных изданиях:

1. Артамонов Е.В., Смолин Н.И. Проектирование сборных инструментов с многогранными неперетачиваемыми пластинами / Тюм. инд. ин-т. – Тюмень, 1989. – 128 с. – Деп. в ВИНТИ 1989, Б.У. № 11.

2. Артамонов Е.В., Ефимович И.А., Смолин Н.И., Утешев М.Х. Напряженно-деформированное состояние и прочность режущих элементов инструментов. – М.: Недра, 2001. – 199 с.

3. Артамонов Е.В., Помигалова Т.Е., Утешев М.Х. Исследование напряжений, деформаций и прочности сменных режущих пластин методом конечных элементов. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2002. – 147 с.

4. Артамонов Е.В. Прочность и работоспособность сменных твердосплавных пластин сборных режущих инструментов. – Тюмень: ТюмГНГУ, 2003. – 192 с.

5. Утешев М.Х., Артамонов Е.В. Исследование напряженного состояния режущей части инструмента интерферометрическим методом при резании с переменной толщиной среза// Надежность режущего инструмента: Труды Всесоюзн. научно-техн. конф.– Киев – Донецк: Вища школа, 1975. – Вып. № 2. – С. 70-74.

6. Артамонов Е.В., Утешев М.Х., Некрасов Ю.И. Исследование напряженного состояния режущей части инструментов с применением оптических квантовых генераторов// Геометрические методы исследования

деформаций и напряжений: Труды 2-го Всесоюзного семинара. – Челябинск, 1976. – С. 137-146.

7. Артамонов Е.В. Твердосплавные фрезы// Машиностроитель. – 1977. – №14. –С. 27.

8. Утешев М.Х., Некрасов Ю.И., Артамонов Е.В. Измерение в пластинах поперечных деформаций с высоким градиентом // Заводская лаборатория. – М., 1977. – №7. – Том 43. – С. 889-891.

9. Утешев М.Х., Некрасов Ю.И., Артамонов Е.В. Голографическая установка для исследования напряженно-деформированного состояния режущей части инструмента // Станки и инструмент. – 1978. – № 6. – С. 38-39.

10. Расторгуев Г.В., Артамонов Е.В., Некрасов Ю.И. Экспериментальные исследования коэффициента динамичности методом лазерной интерферометрии // Нефтепромысловое строительство. – М.: ВНИИОЭНГ, 1980. – №3. – С. 10-11.

11. Артамонов Е.В., Некрасов Ю.И., Смолин Н.И. Сборный инструмент // Машиностроитель. – 1984. – № 5. – С. 32.

12. Ефимович И.А., Артамонов Е.В., Некрасов Ю.И. Сборная торцовая фреза // Машиностроитель. – 1985. – № 1. – С. 35.

13. Артамонов Е.В., Ефимович И.А. Оптимизация режимов обработки деталей газовых турбин на станках с ЧПУ // Проблемы освоения энергетических ресурсов Западно-Сибирского нефтяного комплекса: Сб. трудов Всероссийской научно-техн. конф. – Тюмень: ТГУ, 1988. – С. 136-140.

14. Артамонов Е.В., Мостовщиков Н.А., Помигалова Т.Е., Разработка программного продукта для определения конструктивных параметров СМП сборных инструментов // Новые материалы и технологии в машиностроении: Материалы международ. научн.-техн. конф. – Тюмень: ТГНГУ, 2000. – С. 16-17.

15. Артамонов Е.В., Костив В.М., Помигалова Т.Е. Повышение работоспособности твердосплавных СМП сборных инструментов // Новые материалы и технологии в машиностроении: Материалы международ. научн.-техн. конф. – Тюмень: ТГНГУ, 2000. – С. 43-44.

16. Артамонов Е.В., Ковенский И.М., Костив В.М., Помигалова Т.Е. Конструкция металлорежущего твердосплавного инструмента повышенной работоспособности // Энергосберегающие технологии в нефтегазовой промышленности России: Материалы международного совещания. – Тюмень: ТГНГУ, 2001. – Ч. 1. – С. 52-55.

17. Артамонов Е.В., Ковенский И.М., Костив В.М., Помигалова Т.Е. Методика определения оптимальных условий резания инструментами из твердых сплавов // Энергосберегающие технологии в нефтегазовой промышленности России: Материалы международного совещания. – Тюмень: ТГНГУ, 2001. – Ч. 1. – С. 142-143.

18. Артамонов Е.В., Ефимович И.А. Исследование динамики напряженно-деформированного состояния режущей части инструмента с

применением лазерной интерферометрии // Юбилейный сборник: Материалы международной конференции. – Киев: КИСМ, 2002.- С. 337-344.

19. Артамонов Е.В., Помигалова Т.Е. Влияние формы сменных многогранных пластин на их напряженно-деформированное состояние // Современные проблемы в машиностроении: Материалы I-й Международной научно-практической конференции. – Томск: ТПУ, 2002. – С. 131-133.

20. Артамонов Е.В. Определение температуры максимальной работоспособности режущих пластин из твердых сплавов // Современные проблемы в машиностроении: Материалы I-й Международной научно-практической конференции. – Томск: ТПУ, 2002. – С. 134-135.

21. Артамонов Е.В. Повышение эффективности обработки деталей газоперекачивающих агрегатов // Известия вузов «Нефть и газ». – Тюмень, 2003. – №6. – С. 40-46.

22. А. с. 778940 СССР, МКИ 023 В 27/16. Сборный резец /Е.В.Артамонов, Н.И.Смолин, Ю.И.Некрасов (СССР). – №2692663/25-08; Заявл. 06.12.78; Оpubл. 15.11.80, Бюл. № 42.

23. А. с. 901844 СССР, МКИ 001 К 7/02. Устройство для измерения температуры / Ю.И. Некрасов, Е.В. Артамонов, И.А. Ефимович, В.С. Воронов (СССР). – № 2884590/18-10; Заявл. 19.02.80; Оpubл. 30.01.82, Бюл. № 4.

24. А. с. 948546 СССР, МКИ 023 В 27/16. Сборный резец /Е.В. Артамонов, Ю.И. Некрасов, Н.И. Смолин (СССР). – №3250286/25-08; Заявл. 25.02.81; Оpubл. 07.08.82, Бюл. №29.

25. А. с. 1143526 СССР, МКИ В23С 5/06. Режущий инструмент / И.А. Ефимович, Е.В. Артамонов, Ю.И. Некрасов (СССР). – № 3629284/25-08; Заявл. 05.08.83; Оpubл. 07.03.85, Бюл. № 9.

26. А. с. 1157601 СССР, МКИ НО 1 КЗ 5/00. Устройство для электрической связи между неподвижным и вращающимся объектами / Ю.И. Некрасов, Е.В. Артамонов, И.А. Ефимович (СССР). – №3573114/24-07; Заявл. 04.04.83; Оpubл. 23.05.85, Бюл. № 19.

27. А. с. 1173179 СССР, МКИ 001В 11/16. Способ исследования деформации материалов в процессе снятия стружки резанием / Е.В. Артамонов, Ю.И. Некрасов, И.А. Ефимович (СССР). – № 3588086/25-08; Заявл. 08.02.83; Оpubл. 15.08.85, Бюл. № 30.

28. Патент РФ 1744445, МПК5 001В 11/16. Устройство для определения упругих постоянных малопластичных металлов и сплавов / И.А. Ефимович, Е.В. Артамонов, Д.В. Каширских (РФ). – №4780782/28; Заявл.09.01.90; Оpubл. 30.06.92, Бюл. № 24.

29. Патент РФ 2023252, МПК5 001М 3/00, 001В 11/16. Способ исследования деформации материала / Е.В. Артамонов, И.А. Ефимович, Д.В. Каширских (РФ). – №4789786/28; Заявл.05.12.89; Оpubл. 15.11.94, Бюл. №21.

30. Патент РФ 2086914, МПК5001В 11/16. Способ исследования деформации режущего инструмента в процессе эксплуатации / И.А. Ефимович, Е.В. Артамонов (РФ). – №4790242/28; Заявл.08.02.90; Оpubл. 10.08.97, Бюл. №22.

31. Патент РФ 2173611, МПК 7В 23В 1/00. Способ определения оптимальной скорости резания твердосплавными инструментами / Е.В. Артамонов, В.Н. Кусков, Т.Е. Помигалова, В.М. Костив (РФ). – №99121439/02(022712); Заявл.12.10.99; Оpubл. 20.09.01; Бюл. №26.
32. Патент РФ 2201316, МПК 7В 23В 27/16. Режущая пластина / Е.В. Артамонов, И.А. Ефимович, Т.Е. Помигалова (РФ). – №2001105806/02; Заявл.01.03.01; Оpubл. 27.03.03, Бюл. №9.
33. Патент РФ 2207936, МПК 7В 23В 1/00. Способ металлообработки твердосплавным инструментом/ Е.В. Артамонов, И.А. Ефимович, В.М. Костив, Т.Е. Помигалова (РФ). Заявл. 4.10.2001; Оpubл. 10.07.03; Бюл. №19.
34. Пол. реш. о выдаче патента на изобретение по заявке №2001135677 от 27.03.03. Способ определения оптимальной скорости резания твердосплавными инструментами / Артамонов Е.В., Кусков В.Н., Костив В.М., Помигалова Т.Е. (РФ). – Заявл. 24.12.01.

Подписано к печати 6.10.2003 г.

Заказ №

Тираж 100 экз.

Уч. изд. л. 2.0

Усл. печ. л. 2.0