

1558510

На правах рукописи

**Петрушин Сергей Иванович**

**ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ОПТИМИЗАЦИИ  
РЕЖУЩЕЙ ЧАСТИ ЛЕЗВИЙНЫХ ИНСТРУМЕНТОВ**

**Специальность 05.03.01 - Процессы механической и  
физико-технической обработки,  
станки и инструмент**

**А в т о р е ф е р а т  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора технических наук**

**Москва - 1998**

**Официальные оппоненты:** доктор технических наук  
профессор Васильев Г.Н.  
доктор технических наук  
профессор Верещака А. С.  
доктор технических наук  
профессор Денисенко В. И.

Защита диссертации состоится « 1 » июля 1998 г.  
на заседании диссертационного совета Д 053.15.04 при Московском  
государственном техническом университете имени Н. Э. Баумана по  
адресу : 107005, Москва, 2-я Бауманская ул. , дом 5.

**С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке МГТУ им. Н.**

1558570

**Усов Б. А.**

15-585510

**Актуальность проблемы.** В технологической системе "станок - приспособление - инструмент - деталь", определяющей эффективность процесса обработки резанием, инструмент обладает наименьшей надежностью. Это вызывает увеличение непроизводительных потерь при эксплуатации сравнительно дорогостоящего металлорежущего оборудования. В свою очередь основная причина низкой долговечности лезвийных инструментов кроется в несоответствии формы, размеров и свойств материала режущей части тем условиям процесса резания, в которых они используются. Поэтому на практике качественные и количественные характеристики инструмента часто адаптируют применительно к заданному обрабатываемому материалу, параметрам режима резания и другим исходным условиям. Эти действия традиционно называются оптимизацией свойств режущих инструментов.

В настоящее время определение оптимальной геометрии и выбор инструментального материала производится на основе проведения трудоемких стойкостных испытаний. Так по данным фирмы Sandvik Coromant на ее экспериментальных установках в исследовательских целях ежегодно истирается около 25000 режущих граней и при этом снимается до 180 тонн стружки. Поэтому задача расчетного определения оптимальных с определенной точки зрения характеристик инструментов представляет собой актуальную проблему как для теории резания материалов, так и для практики металлообработки.

**Цель работы** заключается в создании теоретических основ и разработке научно-обоснованной методологии оптимального проектирования формы и материала режущей части лезвийных инструментов.

Для достижения поставленной цели были намечены следующие основные задачи исследования:

1. Разработать и исследовать теоретические модели стружкообразования при несвободном резании с единственной поверхностью сдвига и с развитыми зонами пластических деформаций и на их основе определить исходные данные для оптимизации режущей части.

2. Установить целевые функции, сформировать критерии оптимальности и разработать методики оптимизации геометрии режущего клина и формы режущей части в плане.

НТБ МГТУ им. Н.Э. Баумана



1558510

Петрушин С.И. Теоретически



3. Исследовать упругость и термоупругость анизотропного режущего клина и предложить методику оптимизации распределения физико-механических свойств инструментального материала.

4. Экспериментально подтвердить принятые в работе теоретические положения и наметить пути практической реализации результатов исследования.

**Методы исследования.** Основной метод решения поставленных задач - теоретический, исходные положения которого базируются на изучении обширного массива экспериментальных данных, накопленных в области теории резания к настоящему времени. При этом положения теории упругости и термоупругости применены к режущему клину инструмента, метод линий скольжения в теории пластичности - к зоне стружкообразования и теория оптимального управления - для оптимизации геометрических параметров и свойств материала режущей части инструментов. При обсчете предложенных моделей широко использовалась вычислительная техника. Экспериментальные методы включали в себя металлографические и фотометрические исследования, а также изучение износа, стойкости и составляющих силы резания при точении резцами со сменными многогранными пластинами (СМП).

**Научная новизна** заключается в следующем:

1. Для несвободного резания материалов предложена и экспериментально проверена гипотеза о постоянстве угла сдвига в направлении схода стружки, на основе которой построена и аналитически описана схема стружкообразования с единственной условной поверхностью сдвига (УПС).

2. Аналитически установлено и экспериментально подтверждено, что угол начального схода стружки при несвободном резании полностью определяется формой режущей кромки и сечением срезаемого слоя. Разработана концепция определения траектории движения стружки по передней поверхности и ее завивания после окончания силового контакта.

3. Разработаны математические модели и построены схемы полей линий скольжения в первичной и вторичной зонах пластических деформаций при свободном и несвободном резании, которые позволяют рассчитывать напряженное состояние в любой точке как внутри этих зон, так и на контактных площадках режущей части.

4. На основе изучения экспериментальных данных сформулированы условия оптимальности геометрических параметров режущей части по критериям равномерного изнашивания и равнопрочности режущего клина и разработаны расчетные методики оптимизации формы режущей части.

5. Впервые предложен метод оптимизации распределения модуля упругости инструментального материала в режущей части с ограничениями по межслойным трещинам и экономичности.

**Автор защищает:**

- схему образования стружки при несвободном резании с единственной УПС и аналитические выражения для описания ее верхней границы как для режущей кромки общего вида, так и для частных ее случаев;

- методику и формулы для определения начального угла схода стружки и траектории движения стружки по передней поверхности режущей части при несвободном резании;

- схемы полей линий скольжения в первичной и вторичной пластических зонах стружкообразования при свободном резании;

- методику расчета нормальных и касательных контактных нагрузок на передней поверхности инструмента;

- идентификацию пятна силового контакта стружки с передней поверхностью и описание формы областей пластических деформаций при несвободном резании;

- формулы связи между составляющими силы резания и параметрами распределения контактных нагрузок при несвободном резании;

- комплексные критерии оптимальности геометрических параметров режущей части;

- сущность взаимосвязи между контактными нагрузками и износом режущей части и условия обеспечения равномерного изнашивания передней поверхности;

- методику оптимизации формы передней поверхности инструмента по целевой функции прочности и аппроксимации этой формы фаской и округлением режущего лезвия;

- методику оптимизации геометрии режущей части в плане;

- основы проектирования стружколомающих элементов на передней поверхности режущей части;

— развитие теории упругости и термоупругости для анизотропного режущего клина;

— условие постоянства радиальных напряжений в режущем клине как критерий оптимальности распределения свойств инструментального материала;

— оптимизацию двух- и трехклинной анизотропной режущей части;

— оптимальные проекты равнопрочной композиционной режущей части инструмента;

— введение ограничения на отсутствие межслойных термических трещин в оптимизацию физико-механических свойств инструментального материала;

— блоки оптимизации и математическое обеспечение системы автоматизированного проектирования токарных инструментов с СМП как общего, так и специального назначения;

— результаты экспериментальных исследований режущих свойств двухслойных СМП из Томала-10;

— технологию получения объемно-анизотропных СМП;

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций определяется физической и математической корректностью постановок задач и использованных в работе методов их решения, адекватностью теоретических моделей экспериментально наблюдаемым закономерностям, высокой сходимостью расчетных и экспериментальных данных, использованием ряда разработок в производственных условиях.

#### **Практическая ценность работы:**

1. Создан комплекс частных методик для определения на стадии проектирования геометрических параметров режущей части лезвийных инструментов, включающий в себя расчеты оптимального переднего угла, равнопрочной формы передней поверхности, параметров упрочняющей фаски, радиуса округления режущих лезвий, оптимальной величины угла наклона главного режущего лезвия и формы стружколомающего порошка по различным критериям оптимальности. Комплекс содержит также методики расчета необходимых для оптимизации исходных данных (угол начального схода стружки, параметры распределения контактных нагрузок, составляющие силы резания и т. п.).

2. Построены равнопрочные проекты композиционного материала режущей части, позволяющие создать новый класс инструментальных материалов - многослойных объемно-анизотропных композитов. Разработаны рекомендации по предотвращению появления межслойных термических трещин, возникающих при изготовлении и эксплуатации многослойных композиций.

3. Разработана система автоматизированного проектирования токарных инструментов с СМП, отличающаяся от существующих наличием блоков оптимизации и специфическим математическим обеспечением.

4. Получены экспериментальные данные по режущим свойствам двухслойных композиционных СМП из Томала - 10 при обработке закаленной стали и серого чугуна.

5. Предложена и экспериментально отработана технология получения многослойных заготовок СМП из различных материалов и установлены перспективные композиции инструментальных материалов.

**Апробация работы.** Основные результаты работы доложены и обсуждены на международной ("Комполит - 95", Барнаул), всесоюзной ("Механообработка 88", Москва), 11-и региональных конференциях и на 8-и семинарах. Полное содержание работы доложено на заседании кафедры ТМРИ (ТПУ, декабрь 1996 г.) и кафедры МТ-2 (МГТУ им. Н. Э. Баумана, январь 1998 г.).

**Публикации.** По материалам работы депонированы две монографии (1984, 1996), опубликованы 35 статей и тезисов докладов конференций.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 138 наименований и приложений. Общий объем диссертации 307 с., из них 245 страниц основного текста и 111 иллюстраций на 62 страницах.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**В главе 1** проанализировано современное состояние объекта исследования, определены цель и задачи работы. Обсуждено понятие оптимальности и предложено для прикладных задач трактовать его в широком и узком смысле этого слова.

Показано, что начиная с Ф. Тейлора рассматривалось влияние геометрических параметров режущей части на износ и стойкость инструментов. Этому направлению оптимизации много внимания уделяла Комиссия по резанию металлов (Е. К. Зверев и др.) и особенно М. Н. Ларин. Параллельно развивалось направление оптимизации геометрических параметров, в котором функцией цели является прочность режущей части (А. И. Бетанели, Г. Л. Хаеи и др.). Еще один аспект проектирования геометрии режущей части при обработке вязких материалов связан с оптимизацией стружкозавивающих и стружколомающих элементов. Отмечено, что в настоящее время на стадии проектирования нет единого подхода к выбору геометрии режущей части, что приводит к корректировке геометрических параметров в процессе эксплуатации и, как следствие, к дополнительным материальным и финансовым затратам.

Форма и размеры режущей части неразрывно связаны с физико-механическими характеристиками инструментального материала, из которого она изготавливается. В последние годы интенсивно развивается отрасль материаловедения, связанная с проектированием и производством композиционных материалов, которая включает в сферу своего внимания материалы для режущих инструментов. Их можно разделить на два класса: инструментальные материалы с износостойкими покрытиями и объемно-армированные композиты. К последним относятся режущие пластины со вставками из сверхтвердых материалов, двух- и трехслойные твердосплавные пластины, пластины Томала-10 и подобные композиции. Выявлено, что критерии оптимизации свойств такого рода инструментальных материалов нечетко сформулированы и зачастую не учитывают основные закономерности как процесса резания, так и эксплуатации инструментов. Это не позволяет целенаправленно проектировать и получать инструментальные материалы с заранее заданными свойствами.

Отмечено, что теория оптимального проектирования относится к одному из быстро развивающихся разделов механики деформируемых сред и может решать задачи отыскания оптимальной с определенной точки зрения формы упругих тел при заданных внешних силовых факторах, оптимальной структуры внутренних свойств тела заданной формы и совместной оптимизации формы и структуры тела. Обсуждены возмож-

ности применения этой сферы знаний для оптимизации режущей части лезвийных инструментов.

На основе проведенного анализа установлено следующее:

1. Из практически значимых эксплуатационных свойств режущих инструментов, зависящих от формы, размеров и материала режущей части, необходимо выделить прочность, износостойкость, стружколомающие свойства и экономичность, которые при оптимальном проектировании должны носить характер целевых функций.

2. Критериями оптимальности могут служить: максимальная прочность; максимальная стойкость; максимальный диапазон изменения параметров режима резания, обеспечивающий надежное завивание и ломание стружки; минимальная стоимость оптимального проекта. Первые два критерия могут быть трансформированы в условия равнопрочности и равномерного изнашивания (самозатачивания) режущей части.

3. Наиболее формализованным является первый критерий оптимальности, так как он базируется на математической теории упругости. Хуже обстоит дело с износом и стойкостью инструмента в связи с отсутствием надежной теории трения в трибологии. Совсем в исходном состоянии находится теория завивания стружки. Вследствие этого в данной работе основной упор сделан на оптимизацию геометрических параметров и материала режущей части по критерию максимальной прочности (равнопрочности). Предпринята попытка перехода ко второму критерию в смысле формоустойчивости режущего лезвия и обеспечения равномерности его изнашивания, а также намечен новый подход к решению задачи улучшения стружколомающих свойств передней поверхности режущих инструментов.

На рис. 1. в системном виде представлен план решения поставленной выше проблемы. Глобальная цель работы разбита на две целевые установки, связанные с определением исходных данных для оптимизации режущей части инструментов и с формулировкой критериев ее оптимальности. Область целеполагания через сформулированные выше задачи связана с промежуточными результатами теоретических исследований и вместе с ними составляет предмет системного анализа проблемы. После разработки частных методик оптимизации геометрических параметров и построения проектов выбранной структуры инструментального материала рассматривается задача синтеза оптималь-

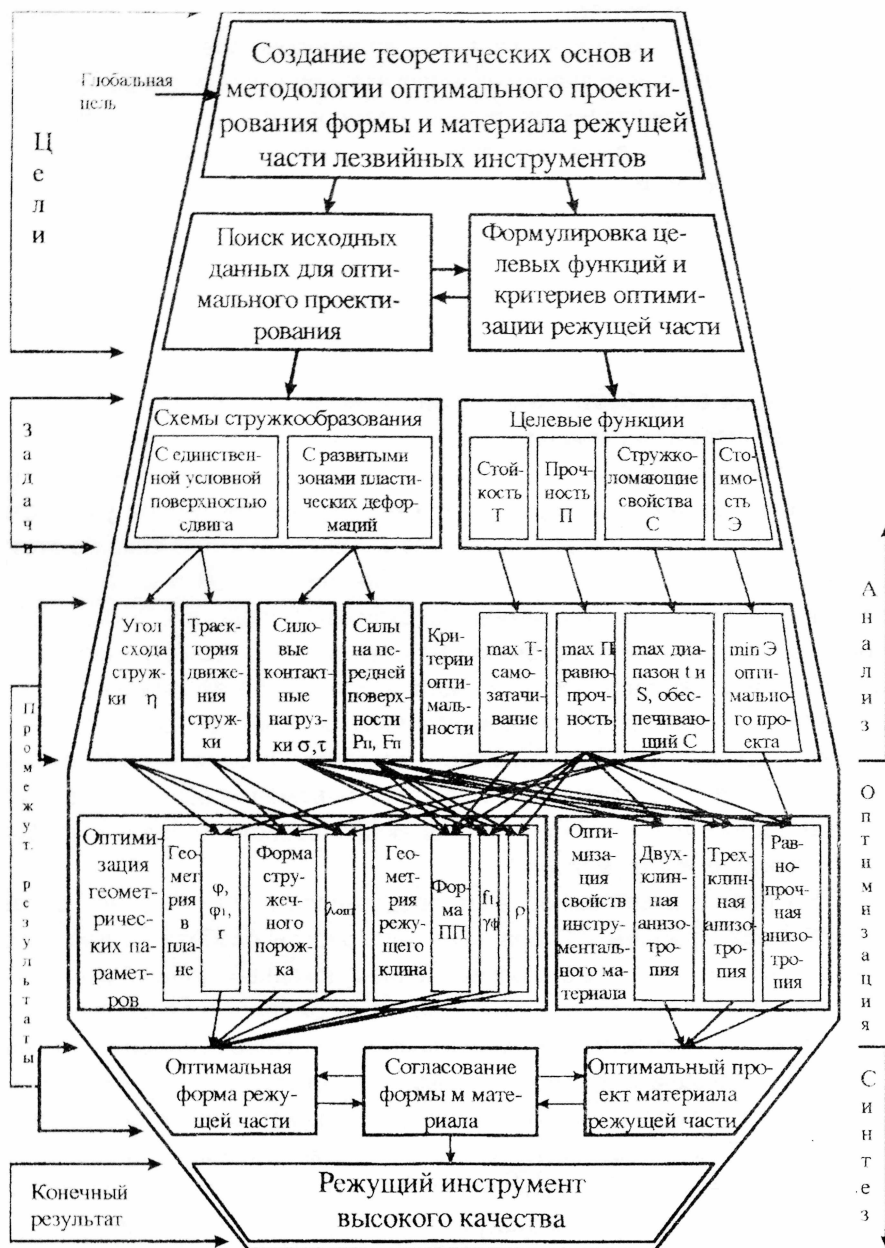


Рис. 1

ного проекта высококачественного режущего инструмента, который является конечным результатом данного решения.

В предлагаемой работе узловые структурные единицы данной системы рассмотрены подробно, а такие этапы, как согласование формы и материала режущей части и ряд других рассмотрены с точки зрения общего подхода.

В главе 2 представлены результаты исследования вопросов механики несвободного резания материалов, связанных с определением исходных данных для оптимизации режущей части. Предложена схема образования стружки с единственной УПС при несвободном резании режущим лезвием криволинейной формы, в основу которой положено предположение, что в направлении схода стружки по передней поверхности угол сдвига  $\beta_1$  имеет одно и то же среднее значение для любой точки рабочего участка режущей кромки (рис. 2). Допустимость такого усреднения установлена на основе измерения углов сдвига по микрошлифам корней стружки, ориентированных вдоль ее направления. Из рис. 2 следует, что средний угол сдвига равен  $\beta_{ср} = \arctg(P_n^n/P_n^t) + \gamma_k - \pi/4$ , где  $P_n^n$  и  $P_n^t$  - нормальная и касательная силы, воздействующие на срезаемый слой со стороны передней поверхности инструмента;  $\gamma_k$  - кинематический передний угол.

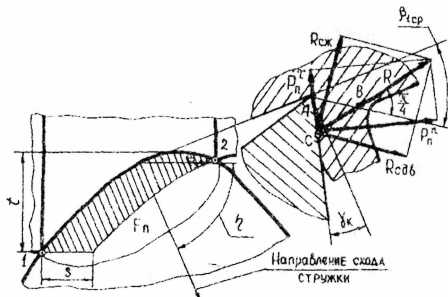


Рис. 2

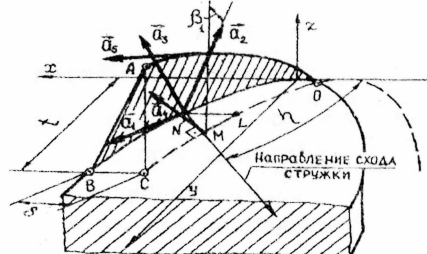


Рис. 3

Применительно к произвольному профилю режущей кромки вида  $y=f(x); z=\varphi(x)$  построена расчетная схема (рис. 3) для описания формы УПС ОАВ и методами дифференциальной геометрии получено общее решение для определения проекций верхней границы УПС следующего вида

$$OA_{xoz} = \frac{1}{\operatorname{tg} \beta_{\text{icp}}} \cdot \int \frac{y'_{1\text{м}} - y' + \operatorname{tg} \beta_{\text{icp}} \cdot z' (\sin \eta + \cos \eta \cdot y'_{1\text{м}})}{\sin \eta + \cos \eta \cdot y'} dx + C_1; \quad (1)$$

$$OA_{yoz} = \frac{1}{\operatorname{tg} \beta_{\text{icp}}} \cdot \int \frac{x' - x'_{1\text{м}} + z' \cdot \operatorname{tg} \beta_{\text{icp}} (\cos \eta + x'_{1\text{м}} \cdot \sin \eta)}{x' \cdot \sin \eta + \cos \eta} dy + C_2, \quad (2)$$

где  $\eta$  - угол начального схода стружки;

$x', y', z'$  - частные производные уравнения режущей кромки;

$x'_{1\text{м}}, y'_{1\text{м}}$  - значения частных производных уравнения предыдущего положения режущей кромки в точке М (см. рис. 3);

$C_1, C_2$  - постоянные интегрирования, определяемые из условия, что в точке О  $OA_{xoz} = OA_{yoz} = 0$ .

Исследованы частные случаи построения УПС для режущей части с острозаточенной вершиной, параболической режущей кромкой и со стандартной геометрией и получены выражения для расчета площадей проекций этой поверхности на координатные плоскости  $xOz$  ( $F_x$ ) и  $yOz$  ( $F_y$ ). Показано, что расчет начального угла схода стружки сводится к расчету этих площадей, то есть  $\operatorname{tg} \eta = F_x / F_y$ . Так, например, для стандартной вершины, образованной прямолинейными главной и вспомогательной режущими кромками и радиусным переходом, имеем ( $\gamma = \lambda = 0$ )

$$\operatorname{tg} \eta = \frac{t \cdot \cos \varphi + r(1 - \cos \varphi - 0,5 \sin^2 \varphi) - 0,25 \cdot S \cdot \sin \varphi}{\sin \varphi \left[ t - r(1 - 0,5 \cos \varphi) + 0,5 \sqrt{r^2 - 0,25 \cdot S^2} \right]}, \quad (3)$$

где  $t$  и  $S$  - соответственно глубина резания и подача;

$\varphi$  - главный угол в плане;

$r$  - радиус при вершине резца.

Эксперименты по измерению угла  $\eta$  на отпечатках пятна силового контакта стружки из стали Ст.5 с передней поверхностью резцов, покрытых слоем меди, показали близкие совпадения полученных результатов с расчетами по (3). Выражение типа (3) задают начальное направление схода стружки. В дальнейшем своем движении она отклоняется в ту или иную сторону вследствие кривизны и наклона передней поверхности к основной плоскости а также особенностей пластической деформации прирезцового слоя. Рассмотрена кинематика движения стружки по передней поверхности и предложен алгоритм пошаговой процедуры определения годографа скорости схода стружки и соответствующего спектра ее траекторий. Разработана схема завивания стружки (рис. 4), основан-

ная на взаимодействии двух интегральных сил:  $R_c$  - проекции силы стружкообразования на направление схода стружки  $\chi'$  и  $F_n$  - силы трения между стружкой и передней поверхностью. В общем случае точки приложения этих сил  $C_c$  и  $C_n$  не совпадают, что приводит к возникновению изгибающих моментов в вертикальной и горизонтальной плоскостях, пропорциональных плечам  $\ell_B$  и  $\ell_T$ . Соотношение плеч отражает соотношение между радиусом и шагом винтовой спирали стружки.

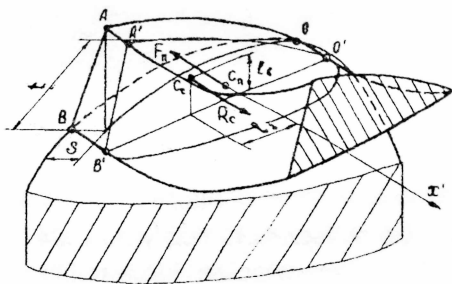


Рис. 4

Для определения характера и величины действующих в зоне стружкообразования напряжений, а также контактных нагрузок на рабочих площадках режущей части предложена и исследована схема образования стружки с развитыми зонами пластических деформаций.

Был использован метод линий скольжения, который вначале применен для свободного резания (рис 5), а затем распространен на схему несвободного резания материалов. Поле линий скольжения в зоне вторичных пластических деформаций построено на основе равномерно распределенных касательных нагрузок на задней поверхности и распределенных по закону  $\tau_n = \tau_m^n \cdot 4\chi \cdot (1 - \chi/\ell_n) / \ell_n$  - на передней поверхности режущей части. Снизу это поле ограничено участком пластического контакта длиной, равной половине общей длины  $\ell_n$  контакта стружки с передней поверхностью, и фаской износа величиной  $h_3$ . Сверху - граничными  $\alpha$ - и  $\beta$ - линиями, координаты точки А пересечения которых определяется путем решения системы уравнений

$$\begin{cases} y = 0,5 \cdot (\sqrt{2} - \sqrt{n}); \\ y = h_3 \cdot (1 - \kappa_{\tau_3}) + 0,5 + 0,25\sqrt{2} \cdot \ln|(\sqrt{2} - 1)/(\sqrt{2} + 1)| - 0,5\sqrt{n} - 0,25\sqrt{2} \cdot \ln|(\sqrt{2} - \sqrt{n})/(\sqrt{2} + \sqrt{n})| \end{cases} \quad (4)$$

где  $n = 1 + 4m - 4m^2$ ;

$m = x/\ell_n$  - относительная абсцисса ( $0 < m < 1$ );

$\kappa_{\tau_3}$  - условный коэффициент трения по задней поверхности.

Поле линий скольжения в зоне первичных деформаций (см. рис. 5) представляет собой ортогональную сетку логарифмических спиралей,

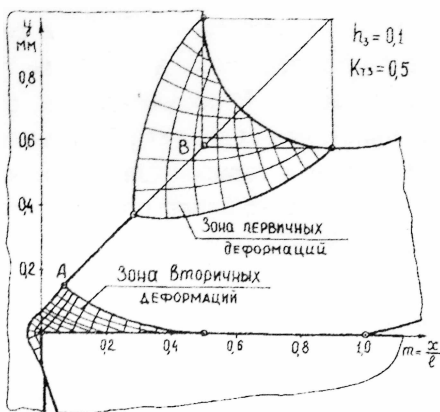


Рис. 5

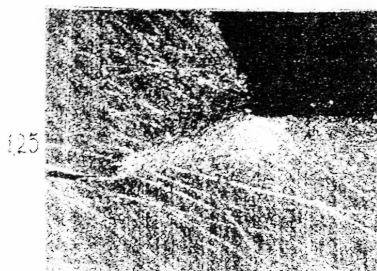


Рис. 6

пересекающих линию АВ и свободную поверхность под углом  $\pi/4$ , для которых получены соответствующие аналитические выражения. Построены частные виды полей скольжения при различных значениях переднего угла, толщины срезаемого слоя, износа задней поверхности, округления режущего лезвия и нароста. Реальность предложенной схемы полей скольжения была подтверждена на экспериментальной установке, позволяющей после остановки процесса резания шлифовать боковую поверхность корня стружки совместно с инструментом и затем вновь производить резание. Одна из микрофотографий серийного эксперимента по Стали 20. приведена на рис. 6.

Была разработана методика расчета напряженного состояния в узловых точках полей скольжения и на длине контакта стружки с передней поверхностью (рис. 7). Здесь  $\sigma_y$  соответствует нормальным контактным нагрузкам, а  $\tau_{xy}$  - касательным. Расчеты показали, что уменьшения контактных нагрузок можно добиться увеличением переднего угла, округлением режущего лезвия и увеличением фаски износа задней поверхности.

Для несвободного резания построена картина зон пластических деформаций (рис. 8), в основу которой положена схематизация пятна силового контакта стружки с передней поверхностью при следующих допущениях, установленных на основе изучения большого массива фо-

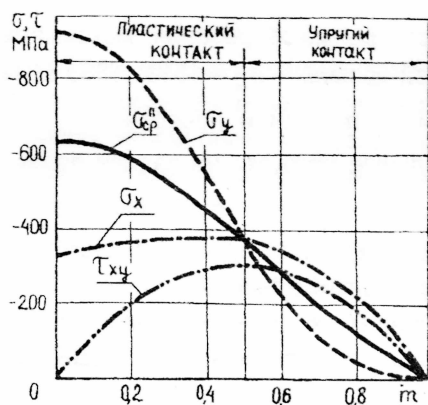


Рис. 7  $\sigma_T = 600 \text{ МПа}$ ;  $\kappa_{T3} = 0,5$ ;  $h_3 = 0,1 \text{ мм}$ .

материала. Эти положения позволили математически описать пятно контакта для острозаточенной и стандартной форм режущей части и получить выражения для расчета касательной силы на передней поверхности, уравнения граничных  $\alpha$ - и  $\beta$ -поверхностей (см. рис. 8), пространственной критической линии, разделяющей зоны первичной и вторичной деформаций при несвободном резании, а также формулы для расчета нормальной силы на передней поверхности.

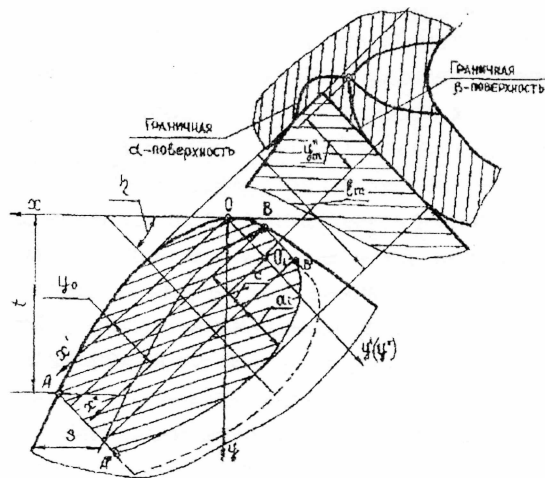


Рис. 8

тографий износа передней поверхности при точении чугуна СЧ 20 резцами с СМП из ВК6. Пятно представляет собой сложную фигуру, имеющую ось симметрии. Эта ось симметрии перпендикулярна к направлению схода стружки. Уширением стружки можно пренебречь. Длина пятна контакта в направлении схода стружки зависит от положения рассматриваемой точки режущей кромки вдоль оси симметрии и пластичности обрабатываемого

Отдельно рассмотрен вопрос о взаимосвязи между технологическими составляющими силы резания и контактными нагрузками, в результате чего получены формулы для расчета параметров распределения контактных нагрузок. По результатам измерения силы резания при наружном продольном точении Стали 40 резцом из Т5К10 получены следующие диапазоны их

значений в зависимости от параметров режимов резания: максимальные нормальные нагрузки на режущей кромке -  $\sigma_m = 1313...5536$  МПа; максимальные касательные нагрузки на передней поверхности  $\tau_m^n = 185...286$  МПа; максимальные касательные нагрузки на задней поверхности  $\tau_m^3 = 2763...6845$  МПа.

В конце главы предложена следующая последовательность применения полученных результатов для оптимального проектирования режущей части: назначить исходные данные; определить уравнение режущей кромки; построить проекции УПС и определить их площади; рассчитать угол начального схода стружки; построить пятно силового контакта стружки с передней поверхностью и определить длину этого контакта; оценить параметры распределения контактных нагрузок; рассчитать нормальную силу и силу трения на передней поверхности; приступить к оптимизации.

В главе 3 приведены результаты оптимизации геометрических параметров режущей части. Для этого они предварительно были разбиты по своему функциональному назначению на две группы: параметры, определяющие форму и размеры режущего клина и параметры, описывающие профиль режущей части в плане. Показано, что для каждой группы существует свой комплексный критерий оптимальности.

Рассмотрена возможность оптимизации формы передней поверхности режущего клина по целевой функции стойкости. На основе изучения результатов микрометрических обмеров, профилографирования и фотографирования износа твердосплавных СМП при обтачивании серого чугуна установлено, что изменение геометрии режущей части в процессе изнашивания оказывает влияние на исходные распределения силовых контактных нагрузок. Сделано допущение, что в нормальном к трущейся поверхности направлении величина износа для конкретной точки передней поверхности прямо пропорциональна величине действующего в ней касательного напряжения ( $h_i = \chi \cdot \tau_i$ , где  $\chi$  - коэффициент износостойкости). Предложено описывать процесс изменения контактных нагрузок на передней поверхности следующими уравнениями:

$$\begin{aligned}\tau_{\tau}^n &= (\tau_0^n - \sigma_0^n y') / \sqrt{1 + y'^2}; \\ \sigma_{\tau}^n &= (\tau_0^n y' - \sigma_0^n) / \sqrt{1 + y'^2},\end{aligned}\tag{5}$$

где  $y'$  - производная профиля лунки в данный момент времени;

$\sigma_0^n$  и  $\tau_0^n$  - соответственно величины исходных контактных нагрузок в данной точке.

Рассмотрена динамика взаимодействия износа с контактными нагрузками и сделан вывод о том, что режущая часть изнашивается таким образом, чтобы перераспределить исходные контактные нагрузки в направлении, снижающим их величину и делающим их более равномерными. Отсюда был сформулирован следующий критерий оптимальности формы передней поверхности по целевой функции стойкости: чтобы получить равномерный износ, необходимо обеспечить постоянство касательных контактных нагрузок. Тогда условие равномерного изнашивания (самозатачивания) режущего клина в дифференциальной форме имеет вид

$$(1-m)(4\tau_m^n \cdot m - \sigma_m \cdot y') / \sqrt{1+y'^2} = \text{const} \quad (6)$$

На рис. 9 построены профили передней поверхности, обеспечивающие равномерное изнашивание при различных уровнях постоянных касательных нагрузок (1 – 0 МПа; 2 – 50 МПа; 3 – 100 МПа; 4 – 150 МПа; 5 – 200 МПа; 6 – 250 МПа). Перейдя к натуральной абсциссе и построив объемную форму лунки износа с использованием предложенной выше идентификацией пятна силового контакта, была разработана методика построения оптимальной формы передней поверхности при несвобод-

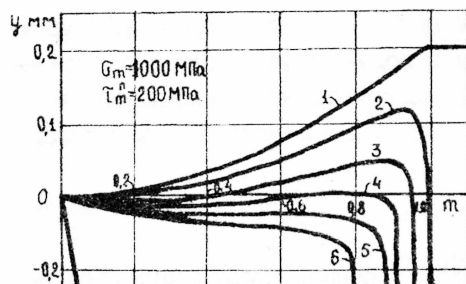


Рис. 9

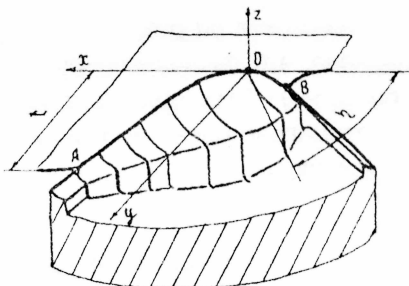


Рис. 10

ном резании, обеспечивающей режим самозатачивания (рис. 10).

Для первой функциональной группы геометрических параметров обоснована следующая формулировка критерия оптимальности по целевой функции прочности: форма режущего клина будет оптимальной, если на его передней поверхности присутствуют равномерные растяги-

вающие напряжения, величина которых ниже предела прочности инструментального материала. В полярных координатах  $r, \Theta$  решена задача определения напряженного состояния в режущем клине, для которой условие оптимальности имеет вид  $\sigma_r = k\sigma_s$  при  $\Theta = -\gamma$ , где  $k$  - коэффициент запаса. Равнопрочные профили передней поверхности, соответствующие этому условию, описываются следующим выражением

$$r = 2 \cdot \frac{P_y \cdot [\beta \cdot \cos \gamma - \sin \alpha \cdot \cos(\alpha + \gamma)] + P_z \cdot [\sin \alpha \cdot \sin(\alpha + \gamma) - \cos \gamma + \beta \cdot \sin \gamma]}{k \cdot \sigma_s \left[ (\sin^2 \alpha - \cos^2 \gamma)^2 - \beta^2 + (\sin \alpha \cdot \cos \alpha - \sin \gamma \cdot \cos \gamma)^2 \right]}, \quad (7)$$

где  $P_y$  и  $P_z$  - составляющие силы резания, отнесенные к единице ширины режущего клина;

$\alpha, \beta, \gamma$  - геометрические параметры режущего клина.

Один из примеров спектра оптимальных профилей приведен на рис. 11. Из него видно, что наличие на передней поверхности постоянных напряжений сжатия приводит к выпуклой ее форме, растяжение - к вогнутой, а при  $k = 0$  (нейтральная линия совпадает с передней поверхностью) она становится плоской. Последний случай позволил оптимизировать значение переднего угла  $\gamma$  в зависимости от отношения составляющих силы резания, а заменив последние через параметры распределения контактных нагрузок - в зависимости от отношения  $h_z/l_n$ .

Опытами по разрушению образцов из твердого сплава ВК6 установлено, что равнопрочные профили, полученные на электроэрозионном станке с ЧПУ, обладают на 1/3 большей прочностью по сравнению с неоптимально ориентированными ( $\pm 10^\circ$ ) по отношению к разрушающему усилию.

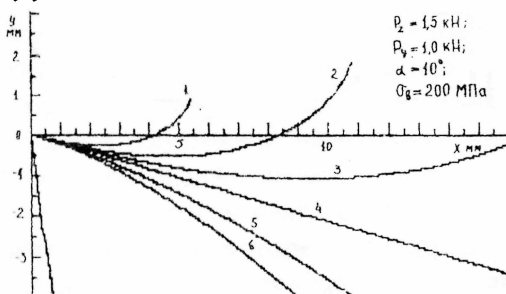


Рис. 11

сти для этого случая имеет вид

Решена также задача термоупругости режущего клина, нагруженного сосредоточенной силой и расположенным в середине контакта точечным непрерывным тепловым источником интенсивностью  $q$  в условиях установившегося теплообмена. Условие оптимально-

$$k \cdot \sigma_B = \frac{2 \cdot E}{r} \cdot \left\{ \frac{(\alpha_T \cdot I_2 + P_z/E) [\sin \alpha \cdot \sin(\alpha + \gamma) - \dots - \cos \gamma + \beta \cdot \sin \gamma] - (\alpha_T \cdot I_1 - P_y/E) [\beta \cdot \cos \gamma - \sin \alpha \cdot \cos(\alpha + \gamma)]}{(\sin^2 \alpha - \cos^2 \gamma)^2 - \beta^2 + (\sin \alpha \cdot \cos \alpha - \sin \gamma \cdot \cos \gamma)^2} - \alpha_T \cdot T \right\}, \quad (8)$$

где  $T = q/\pi \cdot \lambda \cdot \sqrt{\ell_n^2/2 + r^2 - \ell_n \cdot r}$ ;

$$I_1 = \frac{q}{\pi \cdot \lambda} \cdot \left[ \frac{\cos \alpha + 2/3 \cdot \ell_n \cdot r}{\sqrt{\ell_n^2/4 + r^2 - \ell_n \cdot r} \cdot \sin \alpha} - \frac{2}{3 \cdot \ell_n \cdot r \cdot (\ell_n/2 - r)} \right];$$

$$I_2 = q/\pi \cdot \lambda \cdot r \cdot \ell_n \cdot \left( \ell_n/2 - r - \sqrt{\ell_n^2/4 + r^2 - \ell_n \cdot r} \cdot \sin \alpha \right);$$

$\lambda$ ,  $\alpha_T$  и  $E$  - коэффициент теплопроводности, коэффициент линейного термического расширения и модуль упругости инструментального материала.

Расчеты по (8) показали, что увеличение температуры нагрева уменьшает нагрузку на переднюю поверхность и позволяет переходить от отрицательных передних углов к положительным.

Оптимальный профиль передней поверхности под стружкой был определен путем рассмотрения детального нагружения режущего клина распределенными силовыми контактными нагрузками. Для этого была решена поставленная А. И. Бетанели задача определения напряженного состояния клина, в которой были изменены граничные условия, и получено следующее условие оптимальности

$$1/2 + 2 \cdot a_2 \cdot \cos 2\gamma - 2 \cdot c_2 \cdot \sin 2\gamma - r \cdot (1/6 - 4 \cdot a_3 \cdot \cos 3\gamma + 4 \cdot c_3 \cdot \sin 3\gamma) / \ell_n = 0, \quad (9)$$

где  $a_2, c_2, a_3, c_3$  - коэффициенты, зависящие от углов  $\gamma$ ,  $\beta$  и условных коэффициентов трения по передней и задней поверхностям. Вследствие громоздкости их выражения опущены. Расчеты по (9) (рис. 12) показали, что оптимальная форма 1 передней поверхности представляет собой семейство плавных кривых с увеличивающимся передним углом по мере удаления от вершины. На практике прибегают к аппроксимации этой кривой фаской с отрицательным передним углом 2 или радиусом округления 3.

Рассмотрена схема нагружения режущего клина с фаской сосредоточенными силами и контактными нагрузками, в результате чего разработана расчетная методика оптимизации ширины фаски  $f$  и переднего

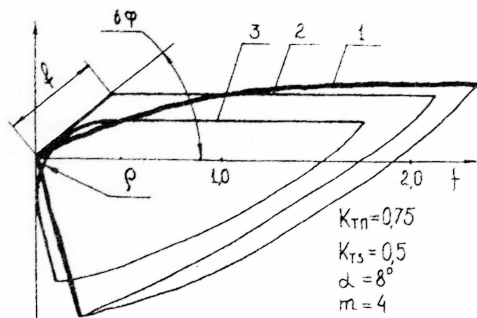


Рис. 12

ческих параметров, для которой на основе анализа стойкостных зависимостей резцов с СМП при обработке серого чугуна выработан следующий комплексный критерий оптимальности: наибольшая стойкость режущей части будет достигаться тогда, когда направление схода стружки совпадает с направлением средней нормали к активному участку режущего лезвия. В этом случае срезаемый слой не стеснен и легко пластически деформируется, что приводит к равномерному износу задних поверхностей режущей части. Управляющим параметром выбран угол наклона главной режущей кромки  $\lambda$ , оптимизирующее значение которого равно  $\lambda_{\text{опт}} = \eta - \Delta$ , где  $\Delta$  - угол, задающий положение средней нормали. Получены соответствующие этому условию аналитические выражения для острозаточенной, параболической и стандартной форм режущей части в плане.

Одним из требований, предъявляемых к форме режущей части при обработке пластичных материалов является условие получения удовлетворительного завивания и ломания стружки. Предложено различать три вида завивания стружки: когда образуется стружка общего вида, плоское завивание, когда стружка постоянно скользит по передней поверхности и кольцевое завивание стружки в вертикальной плоскости. В последнем случае задача ломания стружки значительно облегчается. На основе предложенной схемы завивания стружки (см. рис. 4) установлено, что это возможно, когда плечо  $\ell_r = 0$ , то есть силы стружкообразования и трения, воздействующие на стружку, лежат в одной вертикальной плоскости. Если принять равномерное распределение напряжений на УПС и касательных контактных нагрузок, то определение центров

угла на фаске  $\gamma_\phi$ . Аналогичный подход для округленного режущего лезвия позволил оптимизировать величину радиуса округления  $\rho$ . Приведены номограммы для выбора оптимизируемых параметров.

Геометрия в плане составляет вторую функциональную группу геометри-

приложения этих сил  $C_c$  и  $C_n$  сводится к определению центров тяжести поперечного сечения стружки  $A'O'B'$  и пятна силового контакта  $OO'B'V$ . Для стандартной формы режущей части определены координаты центров сил и расчетами установлено, что при  $\gamma = \lambda = 0$  всегда  $\epsilon_1 \neq 0$ . Показано, что путем изменения угла  $\lambda$  можно добиться кольцевого завивания стружки и получено соответствующее условие оптимальности. Кроме этого решена задача определения профиля стружколомающего уступа как при постоянных, так и переменных параметрах режима резания.

В результате проведенных в данной главе исследований предложена обобщенная методика решения задачи оптимального проектирования геометрических параметров режущей части инструментов.

В главе 4 изложены результаты оптимизации распределения свойств инструментального материала в режущем клине. Показано, что переменные по сечению механические свойства режущей части можно получать путем комбинирования материалов с различными значениями модуля упругости.

Рассмотрена задача определения напряженного состояния в анизотропном режущем клине, нагруженном сосредоточенными составляющими силы резания. Получено решение для клина, у которого модуль упругости зависит только от полярной координаты  $r$  и установлено (рис. 13), что между двумя материалами (например, твердым сплавом и быстрорежущей сталью) необходим переходный слой с плавно изменяющимся модулем упругости. Более сложную картину дает распределение модуля упругости в зависимости от полярного угла  $\Theta$ . Решены

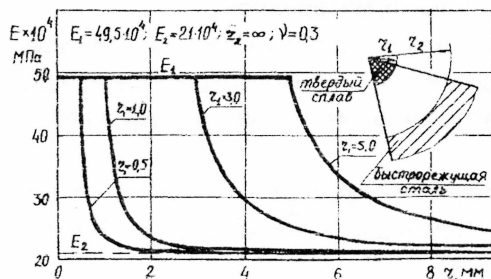


Рис. 13

следующее оптимальное соотношение между полярными координатами

задачи упругости и термоупругости для двухклинной (рис. 14.а) и трехклинной (рис. 14.б) схем. Использование того же критерия оптимальности, что и для изотропного режущего клина, позволило оптимизировать как форму передней поверхности, так и углы раздела клина. Так для рис. 14.а имеем

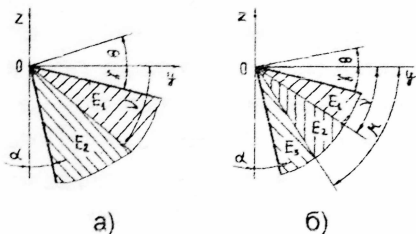


Рис. 14

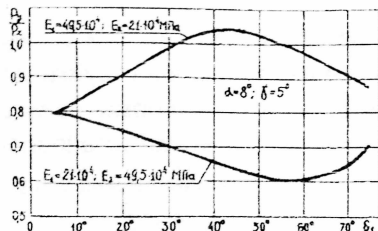


Рис. 15

$$r = 2 \cdot \frac{P_z [b \cos \gamma + (c+a) \sin \gamma] + P_y [(c-a) \cos \gamma + b \sin \gamma]}{k \cdot \sigma_B \cdot (a^2 + b^2 - c^2)}, \quad (9)$$

где  $a = [\sin 2\sqrt{(E_1 - E_2)} + E_2 \sin 2\alpha - E_1 \sin 2\gamma] / 2$ ;  
 $b = \cos^2 \sqrt{(E_1 - E_2)} + E_2 \sin^2 2\alpha - E_1 \cos^2 \gamma$ ;  
 $c = \sqrt{(E_1 - E_2)} - E_1 \gamma + E_2 (\pi/2 - \alpha)$ .

Для разгруженной от напряжений передней поверхности установлено (рис. 15), что существует оптимальное значение угла раздела клина  $\pi$ , соответствующее минимуму отношения составляющих силы резания. Оптимизация термоупругой задачи проводилась по выражению

$$\Delta T = \frac{P_z (b \cos \gamma - a \sin \gamma) + P_y (e \cos \gamma - d \sin \gamma)}{\alpha (bd - ae) / 2 + q (e \cos \gamma - d \sin \gamma) - p (b \cos \gamma - a \sin \gamma)}, \quad (10)$$

где  $p = \alpha_{11} E_1 (\sin \alpha - \cos \nu) + \alpha_{12} E_2 (\cos \nu - \cos \alpha)$ ;  
 $q = \alpha_{11} E_1 (\cos \alpha - \sin \nu) + \alpha_{12} E_2 (\sin \nu - \sin \gamma)$ .

$a, b, d, e$  - коэффициенты, зависящие от углов  $\alpha, \gamma, \beta, \nu$  и  $E_1, E_2$ ;  
 $\alpha_{11}, \alpha_{12}$  - коэффициенты линейного термического расширения исходных инструментальных материалов.

Расчеты по (10) показывают, что как и в случае изотропного режущего клина увеличение разницы между температурами нагрева передней и задней поверхности  $\Delta T$  приводит к снижению общей напряженности в инструментальном материале.

Для трехклинной схемы в зависимости от углов раздела  $\nu$  и  $\mu$  существует глобальный минимум отношения  $P_y/P_z$  (рис. 16), соответствующий условию оптимальности

$$P_y/P_z = [b \cos \gamma + (a+c) \sin \gamma] / [b \sin \gamma + (c-a) \cos \gamma], \quad (11)$$

где  $a = [E_3 \cos 2\alpha + (E_2 - E_3) \sin 2\mu + (E_1 - E_2) \sin 2\nu - E_1 \sin 2\gamma] / 2$ ;  
 $b = (E_3 - E_2) \cos^2 \mu + (E_2 - E_1) \cos^2 \nu - E_3 \sin^2 \alpha + E_1 \cos^2 \gamma$ ;

$$c = E_3 \left( \pi/2 - \alpha \right) + (E_2 - E_3) \mu + (E_1 - E_2) \nu - E_1 \gamma.$$

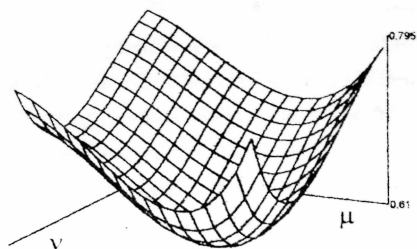


Рис.16

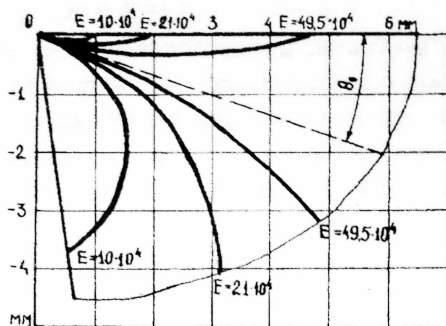


Рис. 17

Показано, что когда модуль упругости зависит одновременно от двух полярных координат, распределение радиальных напряжений определяется выражением

$$\sigma_r = \frac{E_\Theta [(P_x I_2 + P_y I_3) \cos \Theta - (P_z I_1 + P_y I_2) \sin \Theta]}{r(I_2^2 - I_1 I_3)} \quad (12)$$

$$\text{где } I_1 = \int_{-(\pi/2-\alpha)}^{-\gamma} E_\Theta \cos^2 \Theta d\Theta; \quad I_2 = \int_{-(\pi/2-\alpha)}^{-\gamma} E_\Theta \cos \Theta \sin \Theta d\Theta; \quad I_3 = \int_{-(\pi/2-\alpha)}^{-\gamma} E_\Theta \sin^2 \Theta d\Theta.$$

В этом случае для установления условий получения равнопрочного режущего клина была применена единая теория прочности, которая для плоского напряженного состояния и распределения напряжения по (12) имеет вид

$$\sigma_r = \begin{cases} [\sigma]_p / \kappa_3, & \sigma_r > 0; \\ [\sigma]_c / \kappa_3, & \sigma_r < 0. \end{cases} \quad (13)$$

Коэффициент запаса  $\kappa_3$  в (13) учитывает колебания силы резания вследствие неравномерного припуска, износа инструмента, прерывистого резания и т. п.

Поле линий равных модулей упругости, соответствующее условию равнопрочности, задается семейством кривых по уравнению

$$r = \frac{E_\Theta [(P_z I_2 + P_y I_3) \cos \Theta - (P_z I_1 + P_y I_2) \sin \Theta]}{\sigma_{\pi} (I_2^2 - I_1 I_3)} \quad (14)$$

где  $\sigma_{\pi}$  - величина постоянных радиальных напряжений, задаваемых условиями (13).

Для пропорционального углу  $\Theta$  распределения модулей упругости вида  $E_{\Theta} = [(E_1 - E_2)\Theta + E_1(\pi/2 - \alpha) - E_2\gamma]/\beta$  семейство (14) представляет собой кривые третьего порядка с точкой возврата, один из примеров которых показан на рис. 17. Представленный на нем оптимальный проект материала режущего клина дает в области сердцевины нереально высокие значения  $E$ . Так как одновременно с этим каждой марке инструментального материала соответствует индивидуальное сочетание  $E$ ,  $\sigma_{\text{сж}}$  и  $\sigma_{\text{сж}}$ , то в дальнейшем строились граничные линии оптимального расположения того или иного инструментального материала. Такого рода проект назван квазиоптимальным. Рассмотрено влияние соотношения составляющих  $P_z$  и  $P_y$ , а также переднего угла на равнопрочные проекты. При этом получен их широкий спектр, что привело к введению дополнительного критерия оптимальности по стоимости проекта. В результате разработана методика получения экономичных квазиоптимальных проектов режущего клина, которая является основой для разработки технологии производства новых типов композиционных лезвийных инструментов.

В области режущего клина, прилегающей к вершине, полученные результаты не вполне корректны, так как точка приложения сил расположена недопустимо близко. Поэтому было рассмотрено детальное нагружение композиционного режущего клина распределенными контак-

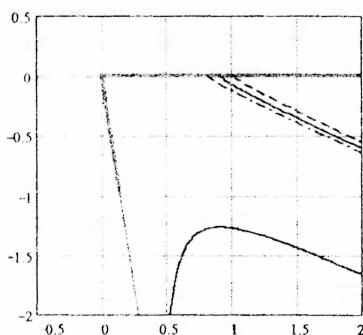


Рис.18: — — — нейтральная линия для зоны растяжения; — — — то же для зоны сжатия; — — — линии твердого сплава.

ными нагрузками и для этого случая получены оптимальные проекты расположения граничных линий твердого сплава, один из примеров которых дан на рис. 18. Из последнего следует, что область твердого сплава выходит на переднюю и заднюю поверхность режущего клина. Это дает возможность придавать режущей части кроме равнопрочности еще и необходимую износостойкость. Исследовано влияние величин  $h_3$  и  $\ell_n$  на подобные оптимальные проекты. Предложено комбинировать анизотропию по сосредоточенным силам (см. рис. 17) с анизо-

тропией по контактным нагрузкам (см. рис. 18).

Одно из ограничений, которое необходимо учитывать при реализации оптимально спроектированной анизотропной режущей части, связано с появлением в композите термических трещин на границе раздела двух фаз вследствие разности в коэффициентах термического линейного расширения. Предложено оценивать трещиностойкость многослойного режущего клина по формуле

$$(\alpha_{\tau 1} - \alpha_{\tau 2}) \Delta T \left/ \left[ \frac{1 - \mu_1}{E_1} + \frac{1 - \mu_2}{E_2} \cdot \frac{\sin(\nu - \gamma)}{\cos(\alpha + \nu)} \right] \right. \leq [\sigma]_p \kappa_3, \quad (15)$$

где  $\alpha_{\tau 1}$ ,  $E_1$ ,  $\mu_1$  - коэффициент термического линейного расширения, модуль упругости и коэффициент Пуассона для первого материала;

$\alpha_{\tau 2}$ ,  $E_2$ ,  $\mu_2$  - то же, для второго материала;

$\Delta T$  - температура нагрева при изготовлении или эксплуатации двухслойного композита.

$\nu$  - угол раздела клина между фазами.

Расчеты по (15) показали, что для известных инструментальных материалов двухклинные композиции возможны внутри группы материалов разных марок. Для получения трещиностойких межгрупповых композиций возможны трехслойные соединения, средний слой в которых состоит из смеси материалов двух других слоев. Определено влияние процентного содержания смеси и угла раздела фаз  $\nu$  на появление трещин при спекании порошковых композитов. Проверена возможность получения двухклинных трехкомпонентных композиций, в которых слои имеют одинаковые коэффициенты  $\alpha_{\tau}$ . В результате выявлены наиболее перспективные проекты анизотропной режущей части.

В главе 5 предложены пути практической реализации проведенных исследований, среди которых выделены два: разработка систем автоматизированного проектирования режущих инструментов как общего, так и специального назначения, а также создание и эксплуатация новых видов композиционных материалов для обработки резанием.

Разработанная САПР РИ с СМП предназначена для проектирования резцов с механическим креплением многогранных пластин при наружном точении и растачивании и осуществляет решение следующих задач: проектирование токарных инструментов с СМП специальной конструкции; выбор из имеющихся варианта конструкции, близкого к рас-

четному; назначение оптимальных геометрических параметров и углов ориентации СМП в корпусе резца; оценка экономической эффективности проектных решений. Приведено необходимое техническое и программное обеспечение системы. Структурная схема САПР включает в себя два блока подсистем: обслуживающие и проектирующие. Описаны работа системы, последовательность проектирования, базы данных и проектирующие процедуры. Отличие данной САПР РИ от известных состоит в том, что в ней использовано разработанное автором математическое обеспечение, которое включает в себя оптимизацию формы передней поверхности СМП по критерию прочности (рис. 19), расчет

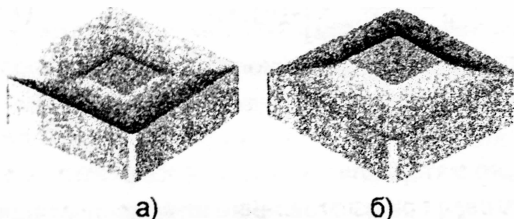


Рис. 19. Формы равнопрочных СМП для обработки: а) –Стали 45; б) –чугуна СЧ 10

геометрических параметров сборного резца и связанных с ними углов ориентации пластины в корпусе, оценку составляющей погрешности обработки, вызванной поворотом или сменой СМП, и детальный расчет экономической

эффективности спроектированного инструмента

Представлены результаты экспериментального исследования режущих свойств двухслойных СМП из Томала-10, рабочий слой которых спечен из микропорошков кубического нитрида бора со связкой. Приведены физико-механические характеристики этого сравнительно нового инструментального материала и данные по ранее проведенным работам. Изложена методика проведения стойкостных экспериментов. В качестве обрабатываемых материалов применяли серый чугун СЧ 20 и закаленную сталь марки 9Х2МФ. Установлен критерий равного износа 1,0 мм. Сравнение Томала-10 с твердым сплавом ВК 8 при черновой обработке чугуна СЧ 20 показало значительные преимущества как по стойкости (в десятки раз), так и по производительности обработки (от 4 до 6 раз). Это следует из стойкостных зависимостей: для Томала-10 -  $v=3700/T^{0.64}$ ; для ВК8 -  $v=340/T^{0.34}$ . Томал-10 может успешно обрабатывать закаленные до 70 HRC<sub>3</sub> стали и заменять их черновое шлифование продольным обтачиванием (для стали 9Х2МФ -  $v = 1340/T^{0.48}$ ).

На основе анализа существующих методов изготовления объемно-

анизотропных СМП предложен способ изготовления заготовок режущих пластин (заявка № 96-106575(011063) от 4.04.96г.), отличающийся тем, что в процессе послойной засыпки в прессформу порошков она вращается вокруг собственной оси с переменной угловой скоростью. Способ реализован на экспериментальной установке, включающей в себя тахогенератор, на валу которого устанавливается нижняя часть прессформы с вкладышем под СМП требуемой формы. Размеры полости вкладыша устанавливались с учетом усадки горизонтальных размеров пластины после спекания. Частота вращения вала тахогенератора регулировалась реостатом. Изготовление композиционной СМП осуществляется следующим образом. Прессформу устанавливают на ось тахогенератора и начинают вращать с угловой частотой  $n_1$ . Затем при помощи дозирующего устройства в нее засыпают порошок материала подложки. Частицы порошка распределяются в полости прессформы и оседают на периферийных участках с образованием верхней фасонной поверхности в виде параболоида вращения. После этого засыпают дозированную порцию порошка инструментального материала и увеличивают или уменьшают частоту вращения до величины  $n_2$ . Последний слой формируют при небольшой скорости вращения  $n_3$ , обеспечивающей плоскую верхнюю поверхность засыпки. Затем прессформу снимают с оси тахогенератора, собирают ее с верхней частью и помещают на стол пресса. Далее прессуют брикет и спекают полученные брикеты.

Предложены также несколько разновидностей рассматриваемого способа, каждая из которых реализует тот или иной проект композиционной СМП. Для двухслойных композиций при  $n_1 > n_2$  (рис. 20) путем комбинирования объемами смесей можно получить выход на режущую вершину материала первого слоя в виде сплошной армирующей коронки (рис. 20.а), в виде армированных вершин (рис. 20.б) и выход материала второго слоя (рис. 20.в). Здесь возможны также варианты работы перевернутой по отношению к засыпке СМП и получения пластин с отверстием (рис. 20.г).

Рассмотрены также варианты трехслойных пластин с режимами вращения при послойной засыпке  $n_1 < n_2 > n_3$  и  $n_1 > n_2 > n_3$ . Способ был реализован путем изготовления оснастки и проведения экспериментов в Филиале ТПУ в г. Юрге и на АООТ "Юргинский машиностроительный завод". Использовались исходные материалы в виде порошков: железо-

графитовая смесь марок ПЖГр1 и ПЖГр2, быстрорежущая сталь Р6М5К5П, твердые сплавы ВК8 и ВК10. В экспериментах применялись также порошковая медь и отходы электрокорунда  $Al_2O_3$ .

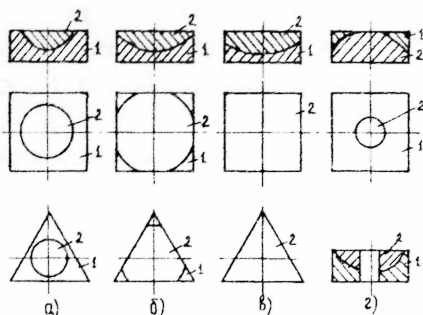


Рис. 20

Как показали эти опыты и в полном соответствии с расчетами на трещиностойкость, прочные соединения получены для материалов одного класса с близкими значениями модуля упругости и коэффициентов термического линейного расширения. Были получены также трехслойные композиции (86 вариантов). Исследова-

лось влияние комбинации материалов пластин, их относительной массы, режима вращения прессформы при засыпке и ряда других технологических факторов на возможность получения прочных прессовок.

Таким образом, предложенная технология изготовления композиционных режущих пластин дает возможность пополнить инструментальные материалы новым классом – объемно-анизотропными равнопрочными экономно армированными режущими элементами.

## ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

1. Оптимальное проектирование инструментов должно осуществляться на основе целевых функций прочности, износостойкости, стружколомающих свойств и экономичности. Предлагается применять в качестве критериев оптимальности формы и геометрических параметров режущей части максимальную прочность, максимальную стойкость, максимальный диапазон изменения параметров режима резания, в котором надежно обеспечивается завивание и ломание стружки, и минимальную стоимость оптимального проекта. При оптимизации свойств инструментального материала режущей части могут быть применены эти же критерии оптимальности за исключением третьего, который связан только с формой передней поверхности инструмента.

2. Наиболее разработанным к настоящему времени является критерий максимальной прочности, который базируется на математической

теории упругости. Применительно к оптимизации режущего клина предложено конкретизировать его в виде следующего условия равнопрочности: режущий клин будет оптимально спроектирован, если в любой его точке (как внутри, так и на передней поверхности) под воздействием внешних нагрузок будут возникать одинаковые радиальные напряжения, величина которых с некоторым запасом не превышает предельно допустимого значения. Такой подход позволил разработать методику оптимизации формы передней поверхности режущей части и отдельных ее элементов, а также получить оптимальные проекты распределения модуля упругости инструментального материала в режущем клине.

3. Для критерия максимальной стойкости (минимального износа) режущей части отсутствует надежная формальная теория трения и поэтому в данной работе был сделан переход к нему через прочность (формоустойчивость) режущей кромки при детальном нагружении режущего лезвия контактными нагрузками, а также через обеспечение равномерного износа задних поверхностей с помощью управления сходом стружки по передней поверхности. Рассмотрена также возможность прогнозирования износа по величине контактных нагрузок.

4. Исходными данными для осуществления оптимального проектирования режущей части являются величина и характер распределения силовых и тепловых нагрузок, направление схода стружки по передней поверхности и ряд других характеристик, связанных с процессами стружкообразования, тепловыделения и трения в зоне резания.

5. В работе предложены и исследованы две схемы образования стружки при несвободном резании: с единственной УПС и с развитыми зонами пластических деформаций. На основе первой схемы разработана методика определения начального угла схода стружки, а вторая дала возможность рассчитывать параметры распределения силовых контактных нагрузок.

6. УПС представляет собой линейчатую пространственную поверхность, проходящую через режущую кромку и наклоненную в направлении схода стружки под средним углом сдвига к основной плоскости. Предложенный подход позволяет осуществлять переход от схемы свободного резания с единственной УПС к схеме несвободного резания, и наоборот. Аналитическое описание границ и площадей проекций УПС как в общем случае, так и для конкретных форм режущей части в плане,

позволяет решать ряд вопросов механики несвободного резания. Так отношение площадей проекций УПС определяет угол начального схода стружки по передней поверхности инструмента, а на основе установления кинематических и динамических связей между поверхностью сдвига и пятном силового контакта разработана концепция расчета траектории движения стружки по передней поверхности и ее завивания.

7. Схема стружкообразования с развитой пластической деформацией построена на основе теории линий скольжения и состоит из зоны первичных пластических деформаций, прилегающей к свободной поверхности стружки и срезаемого слоя, и зоны вторичных деформаций, огибающей режущую кромку. Поля линий скольжения в обеих зонах позволяют определять компоненты напряжений в любой точке пластической области и на ее границах, в том числе рассчитывать контактные нагрузки.

8. Построение областей пластических деформаций при несвободном резании базируется на математическом описании пятна силового контакта стружки с передней поверхностью. Это позволило получить аналитические выражения для расчета нормальной и касательной сил на передней поверхности.

9. Установлена однозначная связь между составляющими силы резания и параметрами распределения контактных нагрузок при несвободном резании. Разработана методика расчета нагрузок по результатам измерения силы резания.

10. На основе проведенных в Главе 2 теоретических исследований и результатов расчетов разработана методика определения исходных данных для оптимизации как геометрических параметров, так и физико-механических свойств инструментального материала режущей части лезвийных инструментов.

11. Оптимизация формы и геометрии режущей части проведена отдельно для двух групп геометрических параметров: геометрии режущего клина в главной секущей плоскости и формы режущей части в плане. Для каждой из этих групп сформулирован свой комплексный критерий оптимальности.

12. Предложенная динамика взаимодействия между износом и контактными нагрузками выявила возможность построения профилей

передней поверхности, отвечающих требованию равномерного изнашивания (самозатачивания) режущего клина.

13. Оптимизация формы режущего клина основана на следующем критерии прочности: радиальные напряжения в каждой точке передней поверхности должны быть постоянны и их величина не должна превышать предела прочности инструментального материала. Согласно этого условия была разработана методика определения оптимального значения переднего угла и формы равнопрочной передней поверхности при нагружении режущего клина сосредоточенными силами и распределенными контактными нагрузками.

14. На основе теории упругости предложена методика оптимизации профиля передней поверхности в зоне ее взаимодействия со стружкой, обеспечивающая формоустойчивость режущей кромки. Проведена также оптимизация параметров упрочняющей фаски и радиуса округления режущего лезвия.

15. Для геометрических параметров режущей части в плане установлен следующий критерий оптимальности, обеспечивающий равномерный износ задних поверхностей инструмента: начальный сход стружки должен происходить по направлению средней нормали к активному участку режущей кромки. На основе этого положения проведена оптимизация углов в плане для частных видов режущей части инструмента. Управляющим параметром здесь служит угол наклона главной режущей кромки.

16. На основе теории упругости анизотропных тел осуществлена оптимизация распределения свойств инструментального материала режущего клина по целевой функции прочности. Путем изменения модуля упругости получены оптимальные проекты сочетания в режущей части различных материалов, обеспечивающие равнопрочность режущего клина. Установлены оптимальные значения углов раздела клина для двух- и трехклинной анизотропии.

17. Решена задача термоупругости как для изотропной, так и анизотропной режущей части, с помощью которой установлено, что нагрев передней поверхности в процессе резания снижает напряженное состояние в клине.

18. Проведена одновременная оптимизация свойств инструментального материала по двум полярным координатам, что позволило по-

строить равнопрочные проекты путем расчета границ раздела слоев с разными модулями упругости. При этом рассмотрено нагружение как сосредоточенными силами резания, так и контактными нагрузками. Введен также дополнительный критерий оптимальности проекта анизотропной режущей части по экономическим показателям.

19. На основе расчета остаточных термоупругих напряжений установлены диапазоны отсутствия трещин при изготовлении композиционных режущих пластин.

20. На базе разработанных методик оптимизации создана система автоматизированного проектирования токарных инструментов со сменными многогранными пластинами, отличающаяся от существующих наличием блоков оптимизации и новым математическим обеспечением. Система внедрена на АООТ "Юргинский машиностроительный завод" с ожидаемым экономическим эффектом за счет экономии времени на конструкторские разработки около 23 тыс. руб. в год.

21. Исследованы режущие свойства композиционных СМП из Томала-10 при обработке серого чугуна и закаленной стали. За счет значительно большей стойкости по сравнению с твердым сплавом, возможности применения при получистовой обработке и прерывистом резании, замены шлифования и других преимуществ Томала-10 его внедрение на АООТ "Юргинский машиностроительный завод" дало экономический эффект в сопоставимых ценах в размере 250 тыс. руб. в год.

22. Разработана технология получения композиционных заготовок СМП из различных материалов, дающая возможность реализовать предложенные оптимальные проекты армирования режущей части. Данная технология прошла экспериментальную отработку, в результате чего выявлены перспективные композиции материала СМП.

Все вышеизложенное позволяет утверждать, что создано новое научное направление — оптимальное проектирование формы и материала режущей части инструмента на основе изучения закономерностей процесса резания.

Основное содержание диссертации отражено в следующих работах автора:

1. Петрушин С.И., Зверев Е.К. Взаимосвязь между силой резания и контактными напряжениями при продольном точении // Повышение технологической надежности механической обработки металлов: Сб. науч.

трудов. - Кемерово, 1977. - С. 120-123.

2. Петрушин С.И., Воробьев А.Ю. О точности обработки деталей резцами // Изв. вузов. Машиностроение. - 1977. - №2. - С.138-141.

3. Петрушин С.И. Расчет геометрических параметров резцов с многогранными пластинами // Изв. вузов. Машиностроение. - 1978. - №1. - С.166-172.

4. Петрушин С.И. Критерии оптимальности геометрических параметров лезвийных инструментов // Механизация и автоматизация ручных и трудоемких операций в промышленности Кузбасса: Тезисы докл. научно-практ. конф. - Кемерово, 1982. - С. 105-107.

5. Петрушин С.И. Оптимальное проектирование режущей части лезвийных инструментов // Деп. рук. ВНИИТЭМР. - 1985. - № 6МШ-85. - 82 с.

6. Петрушин С.И. Определение напряжений в зоне стружкообразования методом линий скольжения с учетом контактных нагрузок // Изв. вузов. Машиностроение, -1987. - №3. - С.117-120.

7. Петрушин С.И. Проектирование режущей части в условиях дефицита инструментального материала // Механообработка-88: Тезисы докладов Всесоюзной конференции. - М., 1988. - С.46.

8. Петрушин С.И. Математическое обеспечение САПР режущих инструментов с многогранными пластинами // Изв. вузов. Машиностроение. - 1989. - №3. - С.126-128.

9. Разработка мероприятий по повышению обрабатываемости чугунных отливок барабана крана КС-4361А. - Отчет о НИР / Руководитель С.И. Петрушин. - ЮФ-2/92; № ГР 0190028404; Инв. № 003700012. - Томск, 1992. - 139 с.

10. Петрушин С.И., Ретюнский О.Ю., Чурбанов А.П. Эффективность применения двухслойных режущих пластин из Томала-10 // СТИН. - 1995. - №2. - С. 13-15.

11. Петрушин С.И. Оптимизация формы режущего клина лезвийных инструментов // Вестник машиностроения. - 1995. - №2. - С. 25-28.

12. Петрушин С.И., Ретюнский О.Ю. Определение условий отсутствия трещин при спекании двухслойных СМП // Композиты - в народное хозяйство России: Тезисы докладов международной конференции КОМПОЗИТ-85. - Барнаул, 1995. - С. 31-32.

13. Петрушин С.И. Схема образования стружки с развитой зоной

пластических деформаций при несвободном резании металлов // Сб. трудов и тезисов 8-й научной конференции филиала ТПУ в г. Юрге. - Юрга, 1995. - С. 66-68.

14. Петрушин С.И. Механика несвободного резания пластичных материалов // Деп. рук. ВИНТИ. - 1996. - №2343-В96. - 106с.

15. Бобрович И.М., Петрушин С.И., Реутов И.А. О компьютерном моделировании равнопрочного профиля передней поверхности многогранных пластин // Тезисы докладов 9-й научной конференции филиала ТПУ в г. Юрге. - Юрга, 1996. - С. 29.

16. Петрушин С.И. Концепция определения траектории движения стружки по передней поверхности режущего инструмента // Тезисы докладов 9-й научной конференции филиала ТПУ в г. Юрге. - Юрга, 1996. - С. 22.

17. Петрушин С.И. Переход от схемы свободного к схеме несвободного резания металлов // Тезисы докладов 9-й научной конференции филиала ТПУ в г. Юрге. - Юрга, 1996. - С. 33-34.

18. Петрушин С.И. Преобразование станочных координат в инструментальные и обратно. // Тезисы докладов 9-й научной конференции филиала ТПУ в г. Юрге. - Юрга, 1996. - С. 46.

19. Петрушин С.И. Проектирование режущей части инструментов из композиционных материалов // СТИН. - 1997. - № 2. - С. 26-29.

20. Петрушин С.И. Равнопрочность режущего лезвия // Сб. трудов X - й науч. конф. филиала ТПУ в г. Юрге. - Юрга, 1997. - С. 45-48.

21. Петрушин С.И. Схема образования стружки округленным режущим лезвием // Сб. трудов X - й научной конференции филиала ТПУ в г. Юрге. - Юрга, 1997. - С. 53 - 54.

22. Петрушин С.И. Термоупругость режущего клина, нагруженного силой резания и точечным тепловым источником // Сб. трудов X - й научной конференции филиала ТПУ в г. Юрге. - Юрга, 1997. - С. 55 - 57.

23. Петрушин С.И. Направление схода стружки и оптимальность геометрии режущей части инструментов в плане // Вестник машиностроения. - 1997. - № 11. - С. 26 - 29.

24. Бобрович И.М., Петрушин С.И. САПР токарных инструментов, оснащенных сменными многогранными пластинами // СТИН. - 1998. - № 2. - С. 34 - 37.