

Министерство высшего и среднего специального образования
СССР

Челябинский политехнический институт
им. Ленинского комсомола



На правах рукописи

Кошин Анатолий Александрович

ИССЛЕДОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ СВЯЗЕЙ
МЕЖДУ ПРЕДЕЛЬНЫМИ РЕЖИМАМИ И ТЕПЛОВЫМИ КРИТЕРИЯМИ
ПРОЦЕССОВ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ

Специальность 05.02.08 – "Технология машиностроения"

Автореферат диссертации
на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинский
политехнический институт
БИБЛИОТЕКА

Челябинск

1974

Работа выполнена на кафедре "Технология машиностроения" Челябинского политехнического института им. Ленинского комсомола.

Научный руководитель - кандидат технических наук,
доцент Корчак С.Н.

Официальные оппоненты: доктор технических наук,
профессор Якимов А.В.;
кандидат технических наук,
доцент Островский В.И.

Ведущее предприятие - Уральский автомобильный завод.

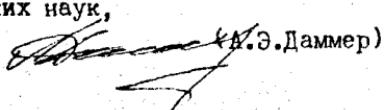
Автореферат разослан " " 1974 г.
Защита диссертации состоится

" " 1974 г. в часов на заседании
Совета по присуждению ученых степеней машиностроительных
факультетов Челябинского политехнического института им.
Ленинского комсомола.

С диссертацией можно познакомиться в библиотеке
института.

Просим Вас и сотрудников Вашего учреждения, интересующихся темой диссертации, принять участие в заседании Ученого Совета или прислать отзывы в двух экземплярах, заверенных гербовой печатью, по адресу: 454044, г. Челябинск, 44, проспект им. В.И.Ленина, 76, секретарю Совета.

Ученый секретарь Совета
кандидат технических наук,
доцент


(А.Э.Даммер)

Повышение производительности технологических процессов является традиционной и по настоящее время актуальной проблемой машиностроения. В то же время требуется обеспечить высокую точность и качество изделий. К этим требованиям, которые сами по себе зачастую противоречивы, добавляются не менее важные вопросы экономичности. Такое многообразие требований к технологическому процессу и большой объем исходных параметров с учетом их сложного взаимовлияния приводит к тому, что технологический процесс осуществляется часто в условиях, далеких от оптимальных.

Реализация образующихся вследствие такого положения резервов производства позволит повысить его эффективность, не увеличивая количество оборудования и обслуживающего персонала, и поэтому является одной из первоочередных задач технологической науки.

Актуальность работы. Оптимизация технологического процесса является результатом научного управления им на целом ряде уровней: от научно обоснованного выбора технологического маршрута до наивыгоднейших режимов на каждой отдельной операции. Научное управление требует формализации информации о технологических процессах, т.е. создания теории этих процессов.

Принятый в настоящее время системный подход к решению задачи оптимизации технологического процесса в качестве модели процесса применяет систему неравенств, каждое из которых описывает то или иное требование (ограничение) к процессу или изделию. Практика процессов алмазно-абразивной обработки и исследования целого ряда ученых по конкретным проблемам этих процессов показывают, что подавляющее большинство требований, предъявляемых к процессам, имеет тепловую природу.

Таким образом, управление процессами алмазно-абразивной обработки требует разработки математического аппарата управления (системы). Причем основная часть системы базируется на анализе теплофизики процессов.

Решение задачи управления даст возможность разработать научно обоснованные нормативы режимов алмазно-абразивной обработки для практического использования в заводской практике и в проектно-технологических разработках. Кроме того, такие данные по управлению в перспективе могут быть использованы при автоматизации процессов и упражнении ими с помощью ЭВМ.

Цель работы. В силу вышеизложенного конечной целью работы является:

1) создание математического аппарата для управления процессами алмазно-абразивной обработки по тепловым критериям, который отражает физику явлений и может использоваться как составная часть общей системы оптимизации процессов и, в частности, режимов;

2) разработка методики технического нормирования процессов по тепловым критериям и создание на ее основе нормативного материала по режимам алмазно-абразивной обработки.

Основные задачи. Для достижения поставленной цели необходим анализ теплофизики процессов алмазно-абразивной обработки, учитывающий все существенные их особенности. Несмотря на большое количество исследований по теплофизике процессов алмазно-абразивной обработки, имеется ряд особенностей теплопередачи, принципиальных для рассматриваемых процессов и либо мало изученных, либо совсем не рассматривавшихся. Для выяснения влияния этих особенностей и создания математического аппарата управления по тепловым критериям были поставлены следующие основные задачи исследования.

1. Построение температурного поля детали с учетом кинематики контактной зоны.

2. Учет влияния температурных зависимостей теплофизических и механических характеристик металла на температурное поле контактной зоны.

3. Учет возможности фазовых переходов.

4. Влияние теплофизических свойств связки на нагрев зерен алмазно-абразивного инструмента.

5. Интенсивность тепловыделения от отдельного режущего зерна.

6. Построение математических выражений, описывающих связи тепловых критериев с управляющими технологическими параметрами.

Общая методика выполнения работы. Современное состояние математической теории теплопроводности позволило провести теоретический анализ температурных полей в обрабатываемой детали и инструменте с учетом перечисленных выше особенностей.

Основная концепция теплофизического анализа, определяющая особенности методического подхода, состоит в том, что температурное поле детали и инструмента возбуждается локальными тепло-

выми импульсами от воздействия отдельных режущих зерен и формируется их распространением и взаимным наложением с учетом геометрии и кинематики контактной зоны.

На базе результатов теплофизического анализа и предложенной зависимости для сил резания отдельным зерном вскрыты функциональные связи температурных характеристик, определяющих значения тепловых критериев, с управляемыми технологическими параметрами (скоростями, подачами и т.д.).

Экспериментальная часть исследования может быть разделена на две группы: 1) определение энергетических характеристик процесса резания отдельным зерном на специально спроектированном и изготовленном инерционном динамометре; 2) проверка практической значимости полученных аналитических результатов по управлению процессами алмазно-абразивной обработки по тепловым критериям. Наличие большого количества исследований по отдельным проблемам процессов алмазно-абразивной обработки позволило наряду с прямыми экспериментами использовать экспериментальные данные других исследователей.

Научная новизна работы состоит в том, что впервые проведена классификация тепловых критериев процессов алмазно-абразивной обработки, выявлены определяющие для каждого критерия характеристики температурного поля и сформулирована задача оптимизации процессов алмазно-абразивной обработки (их режимов) на базе математической модели, отражающей физическую природу процессов и их критериев. Применительно к решению этой задачи проведен теплофизический анализ процессов, учитывающий ряд принципиальных особенностей их теплофизики, ранее не рассматриваемых. Осуществлен непосредственный выход из исследования теплофизики в управление режимами обработки по тепловым критериям.

Практическая ценность и реализация результатов исследования. По критерию теплостойкости алмаза разработана методика определения режимов алмазной обработки, максимально использующих режущую способность алмазных зерен. Рекомендации по предельным режимам алмазной обработки (шлифование, хонингование, суперфиниширование) внедрены в производство на ряде заводов Челябинска и области и включены в третье издание сборника "Общемашиностроительные нормативы режимов резания для технического нормирования работ на шлифовальных и доводочных станках". Годовой экономиче-

кий эффект от внедрения указанных рекомендаций на двух заводах составил 36,4 тысяч рублей.

Полученные результаты являются составной частью общей системы оптимизации, определяя тепловые критерии системы. В случае доминирования тепловых критериев они позволяют осуществить непосредственное управление процессом.

Апробация работы выполнена в Челябинском политехническом институте имени Ленинского комсомола на объединенном заседании кафедр "Технология машиностроения", "Технология металлов", "Станки и инструмент". Материалы диссертации докладывались в 1970-74 гг. в Челябинске, Тольятти, Москве, Перми.

По теме диссертации опубликовано 9 статей.

Диссертация содержит 141 страницу печатного текста, 10 таблиц, 42 рисунка и 5 приложений. Перечень литературы включает 234 наименования.

ТЕПЛОВЫЕ КРИТЕРИИ ПРОЦЕССОВ АЛМАЗНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ И ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ИХ В УПРАВЛЕНИИ ПРОЦЕССАМИ

В управлении процессами механической обработки, и в частности алмазно-абразивным инструментом, сформулирован и развивается целый ряд направлений. Это работы школы Б.С.Балакшина по разработке адаптивных управляющих систем, работы Г.К.Горянского, В.Д.Цветкова по алгоритмизации проектирования технологического маршрута, работы А.Н.Резникова, Н.И.Ящерицына, Н.И.Резникова, В.И.Островского по оптимизации режимов, работы ряда ученых по управлению процессами обработки за счет научно обоснованных различных конструктивных решений: А.В.Якимова - по прерывистому шлифованию, Л.В.Худобина - по способам подачи СОЖ, С.А.Попова - по поиску оптимальной концентрации, зернистости и твердости алмазно-абразивного инструмента, Е.С.Виксмана - по упорядочению и ориентированию алмазных зерен и т.д.

Процесс механической обработки должен обеспечить выполнение определенных требований по качеству изделия (чистота обработанной поверхности, точность, качество поверхностного слоя), по производительности процесса, экономичности. Повышение производительности сдерживается кроме требований качества изделия еще и возможностями системы СПИД - ее жесткостью, прочностью инструмента, периодом его стойкости и т.д.

В наибольшей мере при управлении все эти факторы учи-

тываются методом, развитым в работах А.Н.Ревникова, П.И.Ящерицына, В.И.Островского и ряда других ученых применительно к оптимизации режимов обработки. Согласно этому методу каждое ограничение, его связь с управляющими технологическими параметрами-скоростями, подачами и т.д. - описывается отдельным неравенством. Объединение неравенств образует общую систему оптимизации. Неравенства, как правило, являются результатом регрессионного анализа экспериментальных данных и имеют либо сразу линейный вид, либо приводятся к нему. Поэтому такая задача оптимизации решается известными методами линейного программирования.

Эмпирический характер управляющих неравенств ограничивает область применимости полученных результатов рамками проведенных экспериментов, не позволяя вскрыть физическую природу ограничений, учесть их взаимовлияние и тем более прогнозировать изменения процесса по известным свойствам обрабатываемого материала и инструмента.

Анализ исследований по конкретным проблемам процессов алмазно-абразивной обработки, рассматривающих физику явлений перечисленных выше ограничений, показал, что многие из них имеют тепловую природу. В табл.1 приведена разработанная классификация критерии, имеющих тепловую природу, и указаны характеристики температурного поля, определяющие значение каждого теплового критерия.

Таблица 1

Тепловые критерии процессов алмазно-абразивной обработки

Группа	Тепловые критерии	Причины введения и практическая значимость	Определяющие температурные характеристики
1	2	3	4
I	Структурные превращения в обрабатываемом материале	Дефектный слой с измененными механическими свойствами	Критическая температура нагрева металла Скорость изменения температуры
II	Остаточные напряжения в изделии	Малая циклическая прочность, трещины в хрупких материалах	Пределная температура нагрева металла Пределочный градиент температурного поля в изделии

Продолжение табл. 1

1	2	3	4
	Термомеханический износ алмаза и абразива	Низкая стойкость инструмента	Предельная температура нагрева зерна Предельный градиент температурного поля в зерне
IV	Физико-химический износ алмаза и абразива		Предельная температура в контакте зерна с металлом
V	Обрабатываемость материалов (влияние температуры металла на его механические свойства)	Создание наилучших условий резания. Производительность	Температура подогрева металла
VI	Механика контактных явлений (влияние температуры на трение, адгезию и т.д.)	Перераспределение усилий в зоне резания	Контактная температура

Процессы теплопередачи сравнительно хорошо изучены, что позволяет провести теоретическое исследование температурных полей в процессах алмазно-абразивной обработки, достаточно полно отражающее их специфику, и увязать температурные характеристики тепловых критериев с управляющими технологическими параметрами. Полученные таким образом управляющие неравенства будут отражать физику тепловых критериев и будут содержать лишь необходимые параметры и физические свойства обрабатываемого материала и инструмента.

Развитием этих идей является предлагаемый новый вариант общей системы оптимизации. Ее неравенства базируются на физических гипотезах описываемых явлений и построены с применением фундаментальных законов, т.е. являются следствием физической теории процесса. Естественно, что такие неравенства могут не сводиться к линейным, однако привлечение математического аппарата нелинейного программирования делает возможным решение такой задачи с использованием ЭВМ.

Большой вклад в исследование теплофизики процессов алмазно-абразивной обработки внесли работы советских ученых технологов А.Н.Резникова, П.И.Ящерицна, А.А.Маталина, А.И.Исаева, С.С.Силина, С.Г.Редько, А.В.Якимова, В.А.Сипайлова, А.В.Подзеля, Г.В.Бокуцави, Н.В.Дилигенского, В.И.Островского, В.И.Пилинского, Г.А.Нанарьина и многих других. Велико число известных решений

температурных задач для различных способов алмазно-абразивной обработки, выполненных как для детали, так и для инструмента. Однако эти решения не могут быть использованы для целей поставленной выше задачи оптимизации, т.к. они недостаточно отражают физику рассматриваемых процессов и потому не позволяют определить все необходимые для тепловых критериев температурные характеристики (табл.1). Проведенный анализ выявил ряд теплофизических особенностей, принципиальных для процессов алмазно-абразивной обработки и либо мало, либо совсем неизученных. Эти особенности перечислены выше, они и послужили основанием для постановки основных задач исследования.

ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ ДЕТАЛИ В ЗОНЕ ОБРАБОТКИ

Поскольку, как указывалось, температурное поле детали и инструмента есть результат локальных тепловыделений в зоне действия отдельных режущих зерен, для выяснения реального характера поля необходимо учитывать структуру зоны обработки (дуги контакта) и ее кинематику. На рис.1 показана расчетная схема, учитывающая эти особенности и позволяющая выяснить кинематику температурного поля детали. Реализация этой схемы приводит к второй краевой задаче для двухмерного уравнения теплопроводности с конвективным членом и подвижным пульсирующим источником на границе полуплоскости.

Применением метода функций Грина получено аналитическое решение этой задачи.

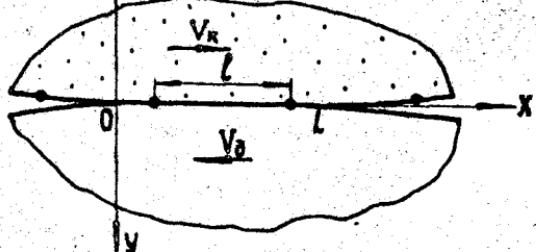


Рис.1. Расчетная схема при анализе кинематики температурного поля детали в зоне обработки

$$U(x,y,t) = \frac{a}{2\pi\lambda} \sum_{k=0}^{\infty} H\left(t - \frac{kL}{V_k}\right) \int_{b_k}^{b_k^*} e^{-a_k(2b_k + t' + \frac{1}{t'})} \frac{dt'}{t'} ;$$

$$a_k = \frac{(V_k + V_a)\sqrt{(x + kL - V_k t)^2 + y^2}}{4\pi} ;$$

$$b_k = \frac{x + kL - V_k t}{\sqrt{(x + kL - V_k t)^2 + y^2}} .$$
(1)

$$\gamma_k' = \frac{V_k + V_0}{\sqrt{(x + kL - V_k t)^2 + y^2}} \left[t - \frac{L + kL}{V_k} H\left(\frac{L + kL}{V_k}\right) + \frac{(L + kL - t)}{V_k} H\left(\frac{L + kL}{V_k} - t\right) \right],$$

$$\gamma_k^2 = \frac{V_k + V_0}{\sqrt{(x + kL - V_k t)^2 + y^2}} \left[t - \frac{kL}{V_k} H\left(\frac{kL}{V_k}\right) + \frac{kL}{V_k} H\left(\frac{kL}{V_k} - t\right) \right],$$

где $U(x, y, t)$ – температура в точке (x, y) в момент времени t ;

Q – интенсивность тепловыделения от воздействия отдельного режущего зерна;

λ, α – соответственно теплопроводность и температуропроводность обрабатываемого материала;

$H(z)$ – функция Хевисайда.

Каждое слагаемое в сумме (1) – это вклад очередного зерна в температурное поле детали. Функция Хевисайда $H(z)$ обрывает суммирование на последнем источнике Q , успевшем попасть на дугу контакта $(0; L)$ к рассматриваемому моменту времени t . Численный анализ решения позволяет проследить процесс формирования температурного поля детали в зоне шлифования и выяснить его кинематику. Как видно из рис. 2, верно, попадая на дугу контакта, воз-

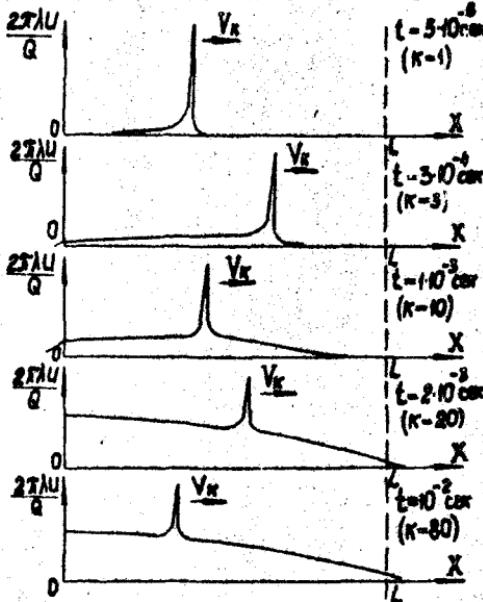


Рис. 2. Мгновенные распределения температур в металле для разных моментов времени

буждает в металле высокотемпературный импульс, который оставляет после ухода зерна как-бы "температурный осадок". "Осадки" отдельных импульсов, суммируясь, образуют некоторый температурный фон на дуге контакта. Конвективный вынос тепла за счет движения детали

V_0 приводит к тому, что через некоторое время температурный фон стабилизируется и образует постоянную составляющую температурного поля. Она не зависит от времени и определяется лишь кинематикой и геометрией процесса. Из рассмотрения регулярного процесса (без начальных условий) установлено, что температурное поле детали в зоне шлифования слагается из постоянной

составляющей и импульсной, характеризующей температуру металла непосредственно под зерном. Получены аналитические выражения для обеих составляющих.

Экспериментальное исследование температурного поля детали проводят, как правило, при помощи термопар, заделанных в деталь. Проходя по дуге контакта, термопара испытывает влияние температурных импульсов от режущих зерен, что и фиксируется регистрирующей аппаратурой. "Температурные ощущения" термопары можно описать решением (1), переводя его в подвижную систему координат, связанную с деталью. Однако сравнительно малое распространение температурного поля против движения детали (за точку $x=L$ на рис.1) позволяет применить теорию быстрого движения Н.Н.Рыкалева и из решения одномерного уравнения теплопроводности получить гораздо более простое выражение

$$U(y,t) = \frac{2Q\sqrt{x}}{\lambda l_3} \sum_{k=0}^n \sqrt{t - \frac{\kappa l}{V_k + V_a}} \operatorname{erfc} \frac{4}{\sqrt{4x(t - \frac{\kappa l}{V_k + V_a})}} H\left(t - \frac{\kappa l}{V_k + V_a}\right) - \\ - \sqrt{t - \frac{\kappa l + l_3}{V_k + V_a}} \operatorname{erfc} \frac{4}{\sqrt{4x(t - \frac{\kappa l + l_3}{V_k + V_a})}} H\left(t - \frac{\kappa l + l_3}{V_k + V_a}\right), \quad (2)$$

где l_3 — размер площадки затупления на зерне;

$n = \frac{V_k l}{V_a l}$ — число импульсов, действующих на термопару за время прохождения ею дуги контакта.

На рис.3 приведен пример температурной кривой, рассчитанной по (2). Применение

микротермопар и безинерционной регистрирующей аппаратуры позволило Пекленiku, а также А.Е.Борисоглебскому и Д. Клаучу получить осциллограммы, очень близкие к расчетной кривой (рис.2). Это подтверждает справедливость принятой концепции,

что температурное поле детали в основном

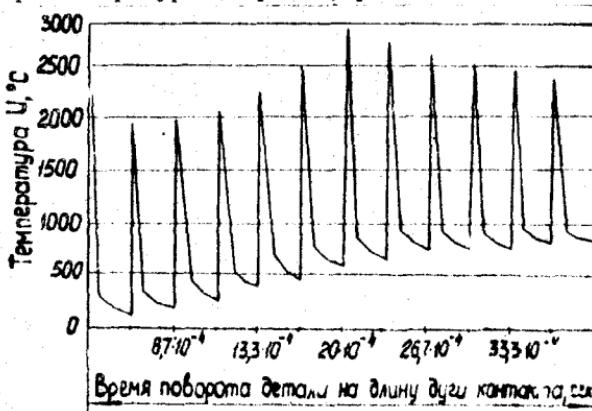


Рис.3. Изменение температурного сечения детали при прохождении им зоны шлифования

формируется последовательным наложением температурных импульсов от отдельных зерен круга. Сопоставлением с решением (1) показано, что минимумы на кривой (рис.3) являются точками постоянной составляющей температурного поля и из (2) получено выражение, позволяющее дискретно, в отдельных точках дуги контакта, вычислить ее значения. Таким образом, постоянная составляющая описывает температурное состояние металла в момент врезания в него очередного зерна.

Исследование кинематики температурного поля выявило действительный его характер, многообразие характерных его точек, двухкомпонентную структуру. Выражения (1,2) получены решением линейного уравнения теплопроводности, т.е. теплофизические и механические свойства обрабатываемого материала принимаются независящими от температуры. Однако справочная литература и специальные исследования показывают, что для сталей в диапазоне температур шлифования перечисленные свойства могут изменяться в два и более раз. Поэтому для более правильной оценки величин температур необходимо провести уточнение температурного поля – учсть влияние нелинейных эффектов.

Влияние температурной зависимости теплофизических свойств. С.Н.Корчаком проведена классификация сталей по этим зависимостям и получены выражения для теплоемкости C и теплопроводности λ : $C = C(U)$, $\lambda = \lambda(U)$. Введение этих зависимостей в уравнение теплопроводности приводит к нелинейной задаче. М.П.Шатуновым и В.Ф.Совкиным показано, что влияние этой нелинейности для сталей становится существенным лишь для температур выше 1000°C . Значит, такое уточнение необходимо для импульсной составляющей. С применением теории быстрого движения оно сводится к второй краевой задаче для одномерного нелинейного уравнения теплопроводности на полупрямой. Решение проводится методом возмущений. Он наиболее удобен для целей работы, т.к. сначала строится традиционное линейное решение, а затем определяются поправки к нему на нелинейность. Ограничивааясь первой поправкой, решение для температуры поверхности представлено в виде:

$$U(0,t) \approx U_0(0,t) \left[1 - Q_3 \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_0} - \frac{c_1}{c_0} \right) U_0(0,t) \right], \quad (3)$$

где U_0 – линейное решение;

$\lambda_0; \lambda_1; c_1; c_0$ – соответственно нулевой и первый коэффициенты разложения функций $\lambda = \lambda(U)$ и $C = C(U)$ по степеням U .

Для определения этих коэффициентов разработан метод использования разложения по ортогональным полиномам Якоби, позволяющий дальнейшие уточнения просто суммировать к полученному решению, не изменяя его коэффициентов.

Расчеты по (3) для представителей каждой группы показали, что изменяемость теплофизических свойств для хромоникелевых сплавов снижает температуру по сравнению с линейным решением до 20%, для остальных увеличивает – также в пределах 20%.

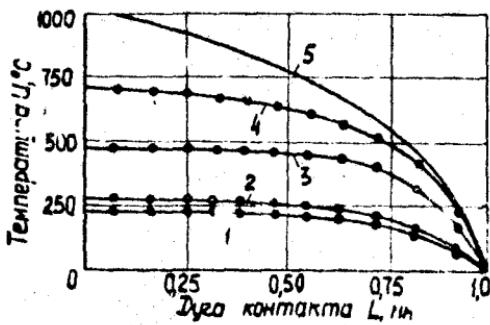
Влияние температурной зависимости механических свойств.

Эта зависимость оказывает обратное влияние на интенсивность тепловыделения, поскольку с изменением механических свойств меняется сопротивление металла разрушению, а следовательно, и энергозатраты на резание. Зависимости $b(U)$ исследовались Г.В.Бокучавой, П.И.Ящерицким, С.Н.Корчаком получены функции $b_l(U)$ для распространенных сталей, учитываящие кроме температуры влияние и скорости деформации. Учитывая эти зависимости, можно корректировать мощность каждого теплового источника в зависимости от температуры металла в момент врезания в него зерна. Для реализации этого алгоритма удобно выражение для дискретного расчета постоянной составляющей, поскольку она именно эту характеристику температурного поля и определяет. Разложением в ряд для тонких поверхностных слоев из (2) получено довольно простое аналитическое выражение, учитывающее изменяемость механических свойств обрабатываемого материала.

$$U_n(x_m; y) = \frac{1}{\lambda l_3} \sqrt{\frac{xl}{\pi(V_k + V_b)}} \sum_{k=1}^m \frac{Q [U_{m-k}]}{\sqrt{k}} \left(1 - y^2 \frac{V_k + V_b}{2xlk} \right) \quad m = 1, 2, \dots, n \quad (4)$$

На рис.4 показаны кривые постоянной составляющей, рассчитанные для условий круглого наружного шлифования.

Рис.4. Постоянная составляющая температурного поля детали при круглом наружном шлифовании
 1-40ХИМ, алмазный круг,
 2- Р18 "-"
 3-40ХИМ, электрокорунд,
 4- Р18 "-"
 5-40ХИМ "-"
 (не учтена температурная зависимость механических свойств)



Учет возможности фазовых переходов. Максимумы температурной кривой на рис.3 значительно превышают температуру плавления металла. Расчеты показывают, что и при учете изменяемости свойств металлов максимумы импульсной температуры при абразивном шлифовании могут превышать температуру плавления. Таким образом, для уточнения импульсной составляющей необходим учет возможности фазовых переходов. Математическое описание процесса такого нагрева приводит к задаче Стефана для одномерного уравнения на полупрямой с источником на конце. Задача решается с использованием второго метода Н.С.Лейбензона, т.е. строятся независимые решения в жидкой и твердой фазе, которые затем согласуются по уравнению теплового баланса на границе фазового перехода. Решение в твердой фазе построено методом функции Грина, в жидкой - методом Фурье. Практический интерес представляет закон продвижения границы ξ фазовых переходов. Для него получено простое асимптотическое представление

$$\xi = \frac{Qt}{\chi l_3} = \frac{U_{ph}\sqrt{t}}{\chi \sqrt{\pi \alpha}}, \quad (5)$$

где χ - объемная теплопроводность фазового перехода.

Величина ξ определяет глубину возможного расплавления металла, а будучи примененной к фазовым переходам второго рода, - глубину структурных превращений, т.е., величину дефектного слоя.

Таблица 2

Распространение фронта фазовых переходов в металле (проплавление, структурные превращения) при абразивном ($V_k = 35$ м/сек, $V_a = 25$ м/мин, $l_3 = 0,1$ мм, $T = 0,010$) и алмазном шлифовании ($V_k = 35$ м/сек, $V_a = 25$ м/мин, $l_3 = 50$ мк, $T = 0,005$)

Обрабатываемый материал	Глубина возможного расплавления, мк		Глубина распространения структурных превращений, мк
	Абразивное шлифование	Алмазное шлифование	
30ХГСНА	2	18	1
P18	5	47	7
X18H10T	3	25	5
У10А	0,7	10	3

ТЕМПЕРАТУРНОЕ ПОЛЕ ИНСТРУМЕНТА

Теплофизические свойства связок, применяемых в алмазных инструментах, могут быть как выше соответствующих свойств алмаза, так и ниже. То есть связка в алмазном инструменте может работать как теплоизолятор и, наоборот, интенсивно отводить тепло. Поэтому при анализе нагрева алмазного зерна необходимо учесть теплофизическую неоднородность инструмента. Аналитическое решение этой задачи осложняется необходимостью задания границы раздела зерна и связки, т.е. формы зерна. Учитывая стохастичность формы зерна, для качественного анализа характера и степени влияния свойств связки на нагрев зерна принято допущение о сферической симметрии температурного поля. Это допущение приводит к четвертой краевой задаче для одномерного уравнения теплопроводности в сферических координатах. С использованием преобразования Лапласа получены асимптотические представления решений применительно к различным способам алмазно-абразивной обработки. Ниже приведены выражения для максимальных температур нагрева.

алмазное шлифование
периферией круга (кратковременный нагрев) $U(0,t) = \frac{2q\sqrt{\lambda t}}{\lambda} \left[1 - 4L^2 \operatorname{erfc} \frac{L_1}{\sqrt{16\lambda t}} - \frac{L_1}{\sqrt{\lambda t}} \operatorname{erfc} \frac{L_2}{\sqrt{16\lambda t}} \right], \quad (6)$

алмазное шлифование
торцем круга, хонингование (длительный нагрев) $U(0,t) = \frac{qL^2}{12\lambda} \left[\frac{L_1}{L_2} + 3 \left(1 - \frac{L_1}{3t_0} \right) - \frac{L_1}{\sqrt{16\lambda t}} \right], \quad (7)$

абразивное шлифование $U(0,t) = \frac{2q\sqrt{\lambda t}}{\lambda} \left[\frac{1}{\sqrt{t}} - i \operatorname{erfc} \frac{L_2}{\sqrt{16\lambda t}} \right]. \quad (8)$

Эти выражения описывают нагрев зерна за счет совершающей им работы резания и не учитывает тепловое воздействие от соседних источников — работающих зерен. Проведенный анализ влияния соседних источников (учет масштабного фактора зоны обработки) показал, что тоже имеет место, но практически значимо лишь для длительных процессов, например, таких, как хонингование, суперфиниширование и пр. Установлено, что при достаточно больших размерах зоны обработки действие масштабного фактора практически совпадает с традиционным решением для однородного инструмента с усредненными теплофизическими характеристиками.

ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРОЦЕССА РЕЗАНИЯ ОТДЕЛЬНЫМ ЗЕРНОМ

Проведенный анализ теплопередачи выявил характер теплораспределения. Для расчета значений температур необходимо знание

интенсивности тепловыделения, т.е. мощность теплового источника. Учитывая результаты П.А.Ребиндера и Г.И.Епифанова, интенсивность тепловыделения определяется через работу резания. Традиционно работа резания определяется через скорость и силу резания, причем сила резания, как правило, находится экспериментально. В силу принятого методического подхода к исследованию теплофизики через локальные импульсы от отдельных зерен необходимо знание сил, приходящихся на отдельное зерно. В работе показано, что привлечение для этих целей традиционных тензометрических измерительных систем возможно лишь при их динамической тарировке. В результате анализа переходных процессов в измерительной системе предложен метод динамической тарировки и определена область его применимости. Разработан метод прямого измерения работы резания, использующий идею инерционного динамометра, разработанного в Корнелльской лаборатории по аэронавтике. Принцип работы динамометра состоит в том, что при разгоне зерна до скорости резания ему сообщается некоторое количество кинетической энергии и процесс резания производится зерном только за счет этой энергии, при этом происходит потеря скорости, измеряя которую, можно определить затраты на резание. Исследуя процесс такого торможения зерна, получена связь работы резания A с фиксируемым динамометром временем задержки оборота зерна при резании Δt .

$$A = \frac{J\omega^2 \Delta t}{2F - \frac{L}{2R}} . \quad (9)$$

Экспериментальное исследование процесса резания отдельным зерном при варьировании материала и геометрии зерна, глубины риски, обрабатываемого материала позволили установить простейшую зависимость, достаточно полно отражающую влияние свойств обрабатываемого материала и режимов обработки и потому пригодную для целей управления:

$$P_z = k l_d a_z b_z , \quad (10)$$

где a_z – толщина среза, приходящаяся на отдельное зерно;
 k – коэффициент, характеризующий геометрию зоны сдвига.

АНАЛИТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ УПРАВЛЕНИЯ ПО ТЕПЛОВЫМ КРИТЕРИЯМ

Полученные в результате теплофизического анализа аналитические выражения для температурных полей позволяют определить

необходимые температурные характеристики, определяющие значения тепловых критериев (табл.1). Проведенные расчеты показали, что при вполне реальных условиях в процессах алмазно-абразивной обработки развиваются температурные поля, характеристики которых могут достигать и даже превосходить известные для них предельно допустимые значения. Расчеты подтвердили тот известный из практики факт, что соответствующим выбором технологических параметров (конструктивные особенности зоны обработки, вид абразивного материала, режимы) можно обеспечить характеристики температурного поля, удовлетворяющие тепловым критериям процессов. Теоретические зависимости отражают природу и характеристические особенности температурных полей и поэтому представляется возможным использовать их для организации управления по тепловым критериям. Тепловые критерии процессов алмазно-абразивной обработки (табл.1) можно подразделить на три вида: критерии, характеризующие свойства обрабатываемого материала (I₁, II и I₂ группы); критерии, отражающие свойства инструмента (III и IV группы) и критерии, определяющие специфику контактного взаимодействия обрабатываемого материала и инструмента (V₁ группа).

Критерий V₁ группы (механика контактных явлений) определяется величиной температуры в контакте зерна с металлом. Поэтому для формирования предельного соотношения используется выражение для максимума импульсной температуры (3).

Критерии обрабатываемого материала. Для критериев I и II групп в качестве предельной характеристики исследователи дают значения максимально допустимой температуры нагрева поверхности изделия (для распространенных материалов называют 500-1200°). В то же время расчет показывает, что максимум импульсной температуры почти всегда при абразивном шлифовании достигает температуры плавления металла и при алмазном шлифовании тоже достаточно высок. Тогда естественно ожидать наличие дефектных структур в тончайших поверхностных слоях, где концентрируется влияние импульсной температуры. Однако потеря качества поверхностного слоя становится значимой лишь при распространении структурных превращений на некоторую глубину, величина которой определяется условиями эксплуатации изделия и, быть может косвенно, задается техническими условиями. Таким образом при абразивном шлифовании сталей всегда имеют место микродефекты обработанной поверхности и поэтому предельные значения этой глубины определяются зоной более глубоких прогревов, т.е. постоянной составляющей температурного поля (4). - 17 -

Когда требования по качеству поверхностных слоев очень высоки (регламентируются дефекты даже в микрослоях) и процесс имеет соответствующие возможности (меньшая интенсивность тепловыделения в импульсе за счет меньшей прочности обрабатываемого материала или применения алмазного инструмента) по выражению (5) ограничиваются и микродефекты.

Критерии П группы (остаточные напряжения) по своей природе определяются величиной градиента температурного поля. После дифференцирования выражения (2) получается предельное соотношение по градиенту. Но поскольку глубина существенного прогрева детали в зоне шлифования невелика и глубже металла остается практически в исходном состоянии, средний градиент температурного поля можно определять величиной максимальной температуры поверхности металла.

Эти критерии имеют целью обеспечить необходимое качество детали. Критерии У группы направлены на обеспечение максимальной производительности, вернее, на создание наилучших условий обработки металла. Температурная зависимость прочностных свойств металлов позволяет говорить о назначении условий обработки, обеспечивающих минимальное сопротивление металла резанию, т.е. минимальные усилия и энергозатраты в процессе обработки. Это достигается путем поддержания некоторой оптимальной температуры металла в момент врезания в него зерна и задается постоянной составляющей температурного поля при помощи выражения (4).

В предельных соотношениях параметрами управления являются интенсивность теплоподвода q и время нагрева t . Для формирования управляющих неравенств необходима увязка этих параметров с технологическими, посредством которых и осуществляется управление процессом обработки: скорости, подачи и т.д. Эти зависимости составляют предмет кинематики и динамики процессов обработки. Время нагрева t сравнительно просто определяется из кинематических и геометрических соотношений для каждого конкретного способа обработки. Определение интенсивности тепловыделения q значительно сложнее. Выражая ее по известной формуле через силу и скорость резания, можно получить неравенства по тепловым критериям, регламентирующие силы резания. Например:

$$\frac{p}{V} \frac{V_s}{V_{s_0}} < \frac{\lambda U_M}{\alpha} \sqrt{\frac{L}{L}}$$
 (11)

Используя формулы Е.Н.Маслова для длины дуги контакта L и толщины среза a_z и аналитическую зависимость для силы резания отдельным зерном (10), формируются управляющие неравенства для рассмотренных тепловых критериев применительно к различным способам алмазно-абразивной обработки. Например, по (5) для критерия 1 группы

$$\text{круглое наружное шлифование } k_b l \frac{l}{B} \sqrt{\frac{D+d}{Dd}} \frac{V_a S_n t}{V_k} - \frac{U_{np} \lambda}{\alpha} \sqrt{\frac{l_1}{S \alpha V_k}} < \frac{\xi_{np} \chi}{\alpha}; \quad (12)$$

$$\text{плоское шлифование } k_b \frac{l V_a S_n}{B V_k} \sqrt{\frac{t}{D}} - \frac{U_{np} \lambda}{\alpha} \sqrt{\frac{l_1}{S \alpha V_k}} < \frac{\xi_{np} \chi}{\alpha}. \quad (13)$$

Критерии инструмента. Критерии III и 1У. групп регламентируют износ инструмента по тем или иным причинам. Определяющим показателем этих критериев является максимальная температура нагрева зерна. Температурное поле зерна складывается из собственного нагрева зерна за счет совершающей им работы резания и подогрева его вследствие влияния масштабного фактора зоны обработки, т.е. за счет тепловыделения в других зернах. Как показал анализ, фактор подогрева оказывается лишь для столь длительных процессов, как хонингование и суперфиниширование. Поэтому для шлифования управляющие неравенства определяются лишь выражениями для собственного нагрева (6-8). Для процессов хонингования и суперфиниширования учитывается и масштабный фактор зоны обработки

$$\frac{k_b V_p l_1}{4 \lambda} \left[3 + \frac{l_1}{l_0} \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} - 1 \right) - \frac{l_1}{\sqrt{4 x_2 t}} \right] + \frac{2 P V_p \sqrt{x_{cp} t}}{\lambda_{cp} \sqrt{t}} < \frac{U_{np}}{\alpha}, \quad (14)$$

где P — давление бруска;

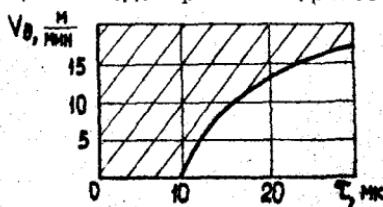
$\{$ — суммарный коэффициент трения бруска о деталь.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПРАКТИЧЕСКОЙ ЗНАЧИМОСТИ АНАЛИТИЧЕСКИХ ТЕПЛОВЫХ КРИТЕРИЕВ УПРАВЛЕНИЯ

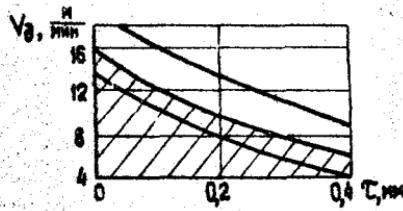
Полученные теоретические решения отражают характер влияния режимных параметров, однако вследствие неизбежных допущений, особенно это относится к определению энергетических характеристик процесса резания отдельным зерном, требуют уточнений по абсолютным величинам. Поэтому полученные неравенства дают хорошее качественное описание границ областей допустимых режимов, хотя для точной привязки может потребоваться конкретизация значений некоторых входящих в неравенства величин. Для этого был

поставлен ряд экспериментов, а также проведено сопоставление с экспериментальными данными других исследователей.

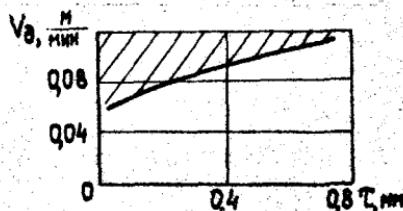
Критерии обрабатываемого материала. При анализе известных практических рекомендаций по критериям I и II групп выявилась интересная особенность – наличие двух принципиально различных видов областей бездефектных (не допускающих прижогов, микротрешин и т.д.) режимов (рис.5).



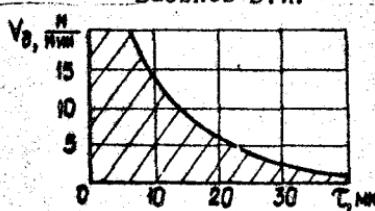
а) сталь ЭИ961
Силин С.С.



в) 1 - титан,
2 - цирконий
Васьков В. И.



б) сталь У8А Ящерицын П. И.



г) BT-3
Островский В. И.

Рис.5. Области бездефектных режимов для различных материалов по данным разных исследователей

Столь различный вид областей бездефектных режимов объясняется различным влиянием режимов обработки на величину сил резания – степенью влияния подачи, в основном. Использование полученных в работе неравенств, отражающих физику явлений, позволяет объяснить эти результаты и прогнозировать характер бездефектной области на основании собственных свойств обрабатываемого материала. Тугоплавкие и жаропрочные материалы, у которых δ_1 с ростом температуры до $600-700^\circ$ изменяется незначительно, по неравенству, образованному из (4), имеют область бездефектных режимов вида (б, г). Для материалов, которые обладают значительным разупрочнением, из (4) получается область вида (5а, б).

Критерий У группы (обрабатываемость) подтверждается экспериментальными данными С.Н.Корчака. Для фиксированных режимов обработки выражение (4) характеризует температуру металла в мо-

мент врезания в него очередного зерна. Соответствующее этой температуре значение b_i определяет сопротивление металла резанию, т.е. в конечном итоге – производительность процесса обработки. Эксперименты С.Н.Корчака показывают довольно хорошую корреляцию между съемом металла в процессе круглого наружного шлифования и значением b_i при 600° (среднее значение постоянной составляющей температурного поля при этом способе шлифования) для целого ряда марок сталей и сплавов.

Критерий инструмента. Практическая значимость критерия физико-химического износа инструмента (Ш группа) для электрокорунда подтверждается экспериментальными данными В.Ю.Шамина, показавшего, что присутствие в обрабатываемом материале марганца и кремния, являющихся катализаторами физико-химических процессов между окисью алюминия и железом и снижающих порог интенсификации этих процессов до 1073°C , резко увеличивает износ зерен электрокорунда по сравнению с износом при обработке равных по прочности, но свободных от указанных элементов материалов.

На рис.6 показаны области предельных по износу круга режимов алмазного шлифования, построенная по данным Н.С.Дегтяренко и А.С.Каменковича, и рассчитанная по предельно допустимой температуре нагрева алмазных зерен (6). Близость этих областей указывает на приемлемость аналитического управления по тепловым критериям износа инструмента.

Критерий теплостойкости алмаза в процессах хонингования и суперфиниширования. Проведенное в работе исследование теплофизики процессов алмазного хонингования и суперфиниширования показало, что большие давления, несмотря на низкие скорости резания, вследствие резкой неравномерности температурного поля, приводят к максимумам температуры нагрева зерна, достигающим предельных для алмаза значений. Для проверки практической значимости критерия теплостойкости алмаза в этих процессах поставлена серия специальных экспериментов.

Выражение (14) определяет время стойкости бруска (зерна)

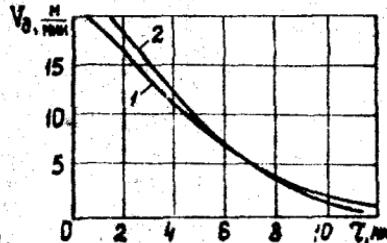


Рис.6. Область режимов, предельных по износу алмазного круга
1-экспериментальная,
2-расчетная

через режимы обработки. На специальной установке экспериментально определялась стойкость при различных режимах. Обработка производилась при постоянном усилии прижима бруска к детали.

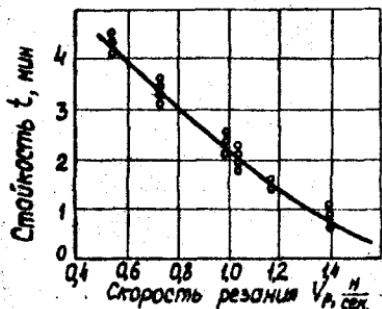


Рис.7. Зависимость стойкости хонинговального бруска от скорости резания для закаленных сталей

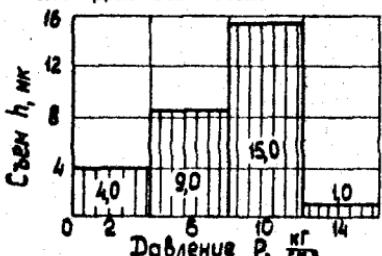


Рис.8. Влияние давления бруска на величину съема металла

тенденция износом алмазных зерен.

Для выяснения причин потери режущей способности брусков проводилось исследование их рабочей поверхности. Микроскопический анализ показал наряду с вырванными из связки и расколотыми наличием большого количества зерен с ярко выраженным плоскими затуплениями. Объективной характеристикой степени и вида износа алмазного бруска является профилограмма его рабочей поверхности с отмеченными на ней участками, принадлежащими алмазным зернам (используется разница в электро проводности алмазных зерен и металлической связки). Такие профилограммы показали, что при обработке закаленных сталей преобладает износ зерен с обработанием плоскостей затупления, что говорит в пользу теплового механизма износа.

Стойкость определялась по моменту прекращения съема металла, что выражалось падением тангенциальной составляющей силы резания. На рис.7 показана теоретическая кривая стойкости при изменении скорости резания и экспериментальные точки для фиксированного давления.

Влияние критерия теплостойкости на изменение производительности исследовалось специальным экспериментом. На разных режимах в течение определенного времени проводилась обработка и измерялась производительность процесса (съем). Характер изменения съема металла при увеличении давления (время обработки 2 мин) показан на рис.8.

Можно положить, что резкая потеря режущей способности бруска при больших давлениях вызвана интенсивным износом алмазных зерен.

Статистическая обработка экспериментальных данных явилась следствием значительного разброса результатов измерений, а также того, что аналитические выражения критерия теплостойкости алмаза, например (14), содержат два коэффициента: κ и f , значения которых также находятся из экспериментов. Поэтому упомянутые выражения можно рассматривать лишь как уравнения регрессии, но отражающие природу описываемых явлений. Оценка неизвестных коэффициентов уравнения регрессии производится по результатам тех же экспериментов, в которых определяется время стойкости. Для этих целей использован байесовский подход, т.е. коэффициенты оцениваются из принципа максимума правдоподобия. Оценка среднего квадратичного отклонения экспериментальных точек, усредненная по всей области изменения параметров, дала 15-20%.

РАСЧЕТ ПРЕДЕЛЬНЫХ РЕЖИМОВ АЛМАЗНОЙ ОБРАБОТКИ. ВНЕДРЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ

Проверка практической значимости аналитического критерия теплостойкости алмаза выявила возможность управления процессами алмазной обработки по нему и, в частности, показала, что среди множества факторов, регламентирующих интенсификацию режимов, критерий теплостойкости алмаза является доминирующим. Это позволило использовать его для расчета режимов алмазной обработки, максимально использующих режущую способность алмазных зерен.

Внедрение рассчитанных по критерию теплостойкости алмаза режимов алмазной обработки было проведено по двум направлениям: 1) подготовлены и внедрены в производство руководящие материалы по режимам алмазной обработки на ряде заводов Челябинска и области; 2) в третье издание справочника "Общемашиностроительные нормативы режимов резания и времени для технического нормирования работ на шлифовальных и доводочных станках" введены новые таблицы режимов алмазного шлифования, алмазного хонингования и суперфиниширования. Приведенные ниже таблицы являются частью нормативных карт, взятых из упомянутых заводских руководящих материалов и общемашиностроительных нормативов. Формы таблиц приняты согласно действующим нормативным материалам.

Для алмазного шлифования в действующих нормативах 1968 года принят единый уровень подач. Вследствие сильного влияния скорости круга на нагрев зерен выделены 3 уровня скоростей,

Таблица 4

Пределенные режимы алмазного хонингования

Скорость вращения диска, мин ⁻¹	20	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70	75	80
Давление на рабочую поверхность, кг/см ²	1	6-9	5-6	4-5	3,5-	4							
Группы обработываемых на мостики на поверхности материнала	II	6-	4-6	3-4	2,5-	3							
		8,5											
III	7-9	5-7	4-5	3-4	2,5-	3							
IV													

- 24 -

Таблица 5

Пределенные режимы алмазного суперфиниширования

Скорость вращения диска, мин ⁻¹	10	10	12	15	18	24	30	45	60	80	100	140	200
Материал обработки	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	XIII
I	5,5	4,8	4,1	3,7	3,3	3,0	2,5	2,0	1,8	1,6	1,3	1,1	1,0
II	5,5	4,8	4,1	3,7	3,3	3,0	2,5	2,0	1,8	1,6	1,3	1,1	1,0
III	3,4	3,0	2,6	2,3	2,1	1,8	1,5	1,25	1,1	1,0	0,8	0,7	0,65
IV	2,3	2,0	1,7	1,5	1,4	1,2	1,0	0,9	0,8	0,7	0,6	0,5	0,4
V	15	13	12	10	9	8	7	6	5	4	3,5	3,2	3,0
VI	15	13	12	10	9	8	7	6	5	4	3,5	3,2	3,0

для каждого из которых по управляемому неравенству задается свое предельное значение поперечной подачи (табл.3).

Предельные режимы алмазного шлифования

Таблица 3

Шлифоваль- ный круг	Скорость вращения круга V_k , м/сек	Скорость вращения детали V_a , м/мин	Поперечная подача на 1 двойной ход стола $S_{\text{пн}}$, мм	Продольная подача $S_{\text{пр}}$, мм/мин
Алмазный	15	30-40	не более 0,006	1000
	25		не более 0,005	
	35		не более 0,004	

Для алмазного хонингования и суперфиниширования в действующих нормативах также принят единый уровень давлений для различных скоростей резания. Учитывая согласованность скоростей вращения хона V_{b_p} и возвратно-поступательного движения V_{b_n} , в табл.4 выделены 13 уровней скоростей, для каждого из которых определены допустимые величины давлений. Широкое применение процесса хонингования для обработки различных сталей и сплавов и довольно сильное влияние на границу области допустимых режимов механических свойств обрабатываемого материала $G_{\text{ши}}$ вызвало еще необходимость градации режимов и по группам обрабатываемости. Аналогичная работа проделана и для суперфиниширования (табл.5).

Основное содержание диссертации опубликовано в следующих работах:

1. Расчет нестационарного температурного поля поверхностных слоев детали в зоне шлифования. В сб. "Тезисы докладов научно-технической конференции "Прогрессивные методы и инструменты для обработки резанием и пластическим деформированием". Челябинск, ИТО, 1971. (В соавторстве с С.Н.Корчаком).
2. Расчет температурного поля зоны шлифования. В сб. "Повышение производительности, экономичности и качества обработки деталей на металлорежущих станках". Ижевск, 1971. (В соавторстве с А.В.Геренштейном и С.Н.Корчаком).
3. К анализу температурного поля зоны шлифования. В сб. "Материалы XXIII научно-технической конференции института".

Челябинский политехнический институт им.Ленинского комсомола,
1971.

4. Аналитическое определение режимов резания по критерию теплостойкости алмазного инструмента. В сб. "Теплофизика технологических процессов" (тезисы докладов на секции "Теплофизика шлифования"). Тольятти, 1972. (В соавторстве с С.Н.Корчаком).

5. Задача Стефана при анализе температурного поля зоны шлифования. В сб."Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки". Сб.научн.трудов ЧПИ, №114, Челябинск, 1972.

6. Аналитические основы ограничений режимов абразивно-алмазной обработки по тепловым критериям. В сб. Тезисы докладов всесоюзной конференции "Теория и практика алмазной и абразивной обработки деталей приборов и машин". МВТУ им.Н.Э.Баумана, 1973. (В соавторстве с С.Н.Корчаком).

7. Выбор режимов шлифования с учетом тепловых критериев. В сб. "Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки". Сб.научных трудов ЧПИ, №145, Челябинск, 1974. (В соавторстве с С.Н.Корчаком).

8. Влияние различных связок на нагрев зерен круга. В сб. "Прогрессивная технология чистовой и отделочной обработки". Сб.научных трудов ЧПИ, №145, Челябинск, 1974.

9. Особенности тензометрирования сил при резании единичным зерном. Доклады АН БССР, №3, 1974. (Совместно с П.И.Ящерицыным, В.А.Акановичем и Г.В.Пустовойтом).

Материалы диссертации доложены:

1. На научно-технических конференциях Челябинского политехнического института имени Ленинского комсомола (1969-74 гг.).

2. На научно-технической конференции "Теплофизика технологических процессов". Тольятти, сентябрь 1972 г.

3. На Всесоюзной конференции "Теория и практика алмазной и абразивной обработки деталей приборов и машин". МВТУ имени Н.Э.Баумана, декабрь 1973 г.

4. На научно-технической конференции в Пермском политехническом институте, декабрь 1973 г.