

УДК 536.24.08

## ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛООБМЕНА ПРИ ШЛИФОВАНИИ ТВЕРДЫХ МАТЕРИАЛОВ

**Ю. М. Мацевитый, А. А. Тарелин, С. Ф. Лушпенко, Н. В. Сурду**

*Институт проблем машиностроения им. А. Н. Подгорного Национальной Академии наук Украины,  
Харьков, Украина*

### **Введение**

Шлифование – один из наиболее энергоемких и термонапряженных процессов резания, при котором в зоне обработки развиваются очень высокие температуры, достигающие в некоторых случаях температуры плавления обрабатываемого материала. При этом на тепловое состояние зоны обработки большое влияние оказывают кинематические параметры шлифования, в первую очередь, скорость перемещения обрабатываемой поверхности относительно абразивного инструмента. Таким образом, эффективность шлифования и качество изготавливаемой детали в большой степени зависит от тепловых условий технологического процесса. Между тем термометрирование во внутренних точках шлифуемой детали или вблизи зоны резания сопряжено с большими трудностями. Поэтому наиболее эффективным способом получения информации в этом случае является моделирование температурного поля обрабатываемого изделия с предварительным экспериментальным изучением условий теплообмена и теплофизических свойств используемых материалов.

Целью данного исследования является компьютерное моделирование температурного поля, возникающего в процессе шлифования детали. При этом используется двух- и трехмерная постановка. Учитывается зависимость теплофизических свойств от температуры и зависимость граничных условий от времени и координат. Кроме того, специфика моделируемых процессов заставляет уделять особое внимание информационной поддержке моделирования, прежде всего, заданию граничных условий и получению данных о теплофизических свойствах, что является предметом решения обратных задач теплопроводности.

Полученные результаты дают возможность выбрать такие режимы шлифования, которые обеспечивают заметную прибавку в производительности и улучшенные структурные свойства обрабатываемых поверхностей. Кроме того, рациональный выбор температурного режима алмазного шлифования, отличающегося по сравнению с традиционной абразивной обработкой меньшими потерями на трение, позволяет существенно уменьшить затраты на энергию и инструментальные материалы.

Удобно весь комплекс возникающих при моделировании температурного поля шлифуемой детали математических и технических вопросов разбить следующим образом: выбор наиболее перспективных способов шлифования для последующего теплового анализа и оптимизации; математическая формализация наиболее важных физических процессов; поиск исходной информации для теоретического исследования выбранных процессов; получение дополнительных входных данных из технологического и физического экспериментов; расчетные исследования по определению наиболее типичных и эффективных технологических режимов; анализ

полученных результатов и оптимизация рассматриваемых режимов; выработка рекомендаций по улучшению изучаемого технологического процесса.

В докладе рассмотрены все эти вопросы. При этом наиболее пристальное внимание сосредоточено на теплофизических и вычислительных аспектах данной проблемы.

## Процесс

Шлифование само по себе является одним из наиболее теплонагруженных технологических процессов. Но самые высокие значения плотностей теплового потока и температур наблюдаются при шлифовании металлических материалов цилиндрической поверхностью круга (при периферическом шлифовании), а также при заточке инструмента со сверхтвердыми вставками. Как правило, заточка режущего инструмента осуществляется с помощью торцевого шлифования (плоской поверхностью шлифовального круга). Мы будем рассматривать только эти две группы материалов и два указанных способа шлифования.

Тепловому анализу подвергаются две схемы шлифования цилиндрическими поверхностями шлифовальных кругов: одноосевая (рис. 1, а) с одним кругом и двухосевая (рис. 1, б) с планетарной головкой, оснащенной несколькими кругами. Рассматриваются шлифовальные круги с прерывистым абразивным покрытием, как на рис. 1, а, или однородными, как на рисунке 1, б.

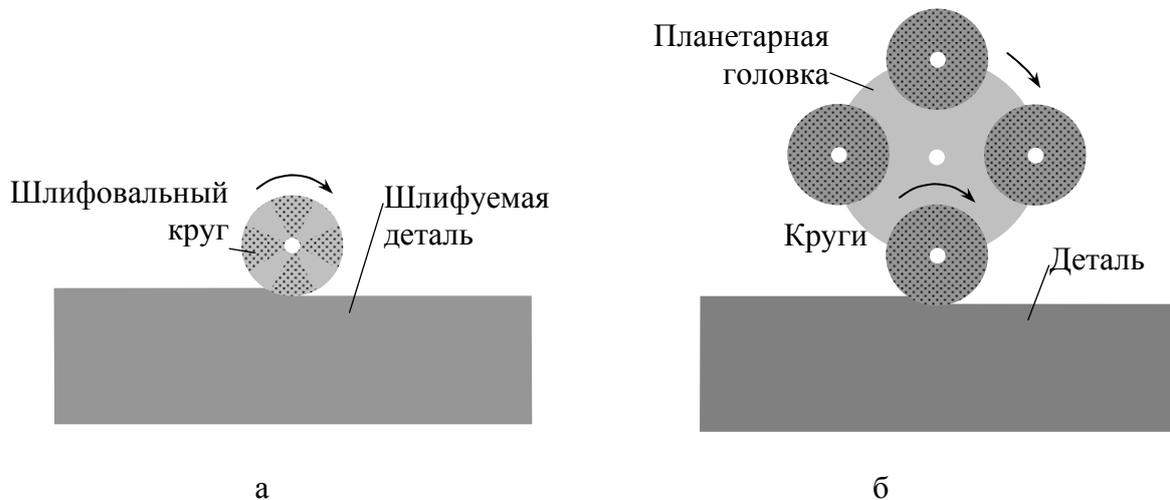


Рис. 1. Периферическое шлифование одноосевое (а) и двухосевое (б).

В настоящее время синтетические сверхтвердые материалы, в состав которых входят искусственные алмазы или кристаллы нитрида бора, становятся все более важными компонентами инструментов для резания труднообрабатываемых материалов. При изготовлении таких инструментов и их заточке чаще используется отличный от вышеописанного тип шлифования, а именно, торцевое шлифование. При этом режущей является плоская поверхность шлифовального круга. Схемы такого заточного шлифования для двух наиболее широко используемых типов сверхтвердых композиционных материалов представлены на рис. 2.

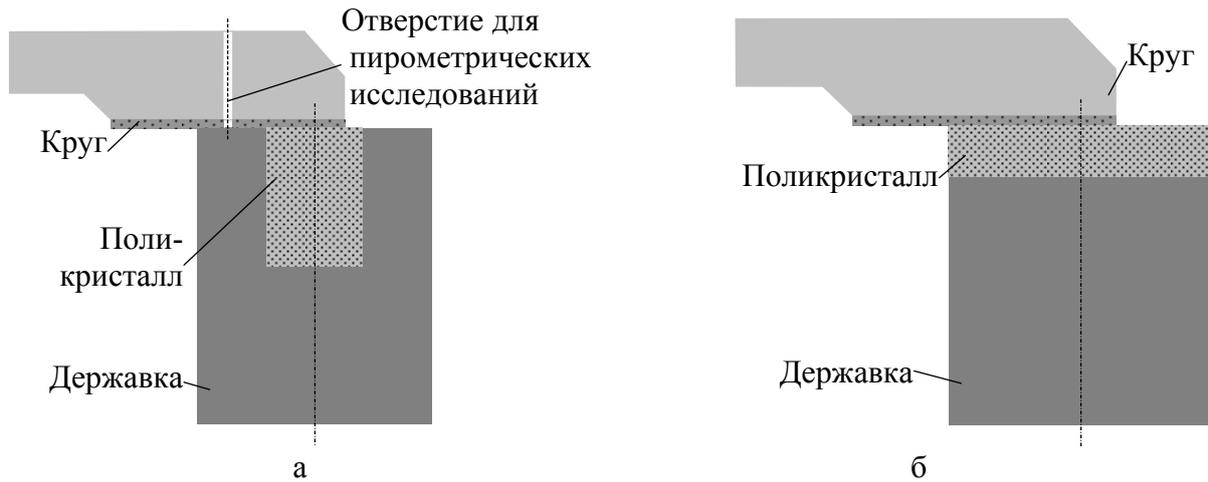


Рис. 2. Торцевое шлифование сверхтвердого поликристалла в коаксиальной державке (а) и двухслойной заготовки со сверхтвердым поликристаллом (б)

## Модель

Получение достоверных исходных данных является первым и, пожалуй, наиболее трудоемким этапом таких исследований в связи с многочисленными дополнительными сложностями, возникающими при термометрировании подвижных объектов, и большим дефицитом информации о теплофизических свойствах обрабатываемых материалов, как правило, новых и малоизученных.

Будем считать, что математическая модель рассматриваемых тепловых процессов входит в состав исходных данных, как их неотъемлемая часть, так как она описывает основные связи между зависимой переменной исследуемого процесса (в данном случае температурой) с независимыми или исходными величинами (в общем случае, функциями) – параметрами начальных и граничных условий процесса. Как и другие исходные данные, математическая модель в процессе моделирования (решения прямой задачи математической физики) не изменяется, в отличие от обратных задач, в которых параметры модели и даже ее структура являются результатами решения задачи.

Поле температур в обрабатываемой детали может выступать в качестве того объекта, по состоянию которого судят о тепловых явлениях процесса шлифования в целом. Эти температуры и их градиенты определяют наличие или отсутствие причин возникновения нежелательных структурных изменений в обрабатываемом материале, а также термических деформаций и образования трещин, и поэтому служат надежным показателем эффективности шлифования. Окружающая среда и смежные с обрабатываемой деталью объекты, включая шлифовальный круг, могут быть приняты во внимание, благодаря их вкладу в формирование исследуемого температурного поля. При таком подходе основным компонентом математической модели будет выступать уравнение теплопроводности, записанное для температур  $T$  во внутренних точках обрабатываемой детали,

$$\frac{\partial T}{\partial x} \left[ \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial x} \right] + \frac{\partial T}{\partial y} \left[ \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial y} \right] + \frac{\partial T}{\partial z} \left[ \lambda(T) \frac{\partial T}{\partial z} \right] = \rho(T) \cdot c(T) \frac{\partial T}{\partial t},$$

где  $x, y, z$  – декартовы координаты;  $k$  – теплопроводность детали;  $\rho$  – ее плотность;  $c$  – удельная массовая теплоемкость;  $t$  – время.

Это уравнение дополняется такими условиями однозначности, как начальные и граничные условия, а также выражениями для теплофизических свойств и геометрических параметров моделируемого температурного поля.

Для точек поверхности детали, попадающих в зону резания, где известен тепловой поток  $q$ , применяется уравнение граничных условий второго рода,

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial n} = \frac{q(x,t)}{S},$$

где  $n$  – координата вдоль оси, перпендикулярной поверхности детали в этой точке;  $S$  – площадь зоны резания.

Температуры на поверхностях, которые обтекает смазочно-охлаждающая технологическая среда или воздух, не могут быть заданы явно и описываются уравнением граничных условий третьего рода

$$-\lambda(T) \frac{\partial T}{\partial n} = \alpha(x, y, z) \cdot (T - T_{\text{ср}}),$$

где  $h$  – коэффициент теплоотдачи;  $T_{\text{ср}}$  – температура среды.

## Данные

Начальные и граничные условия, их форма и значения входящих в них физических величин определяются в результате обработки данных технологического эксперимента, проводимого, как правило, в реальных производственных условиях, или расчетным путем, на основе режимных параметров изучаемого процесса шлифования.

Экспериментальные исследования позволяют определить температуры или плотности теплового потока в различных точках границы изучаемого теплового поля, а также температуры окружающей среды и коэффициенты теплоотдачи у поверхности обрабатываемого изделия. Для измерения температур в зоне резания (между шлифовальным кругом и обрабатываемой поверхностью) был применен пирометр, который воспринимает измерительные сигналы через специальное отверстие в круге (см. рис. 2, а). Тепловой поток в зоне резания может быть определен расчетным путем по экспериментально полученным данным о силе резания, скорости шлифовального круга и концентрации абразивных зерен в материале круга, как это предлагается делать в книге [1].

Параметры других условий однозначности, таких, как теплофизические свойства рассматриваемых материалов и их температурных зависимостей, обычно берутся из соответствующих справочников или баз данных. Однако, существует и другой путь получения таких данных – решение обратной задачи теплопроводности, не имеющий альтернативы, когда приходится иметь дело со слабо исследованными новыми материалами, такими, например, как поликристаллы современных синтетических сверхтвердых материалов. Для получения исходной информации для такого вычислительного метода косвенного измерения теплофизических свойств мы использовали специально разработанную для этой цели схему теплофизического эксперимента, показанную на рис. 3.

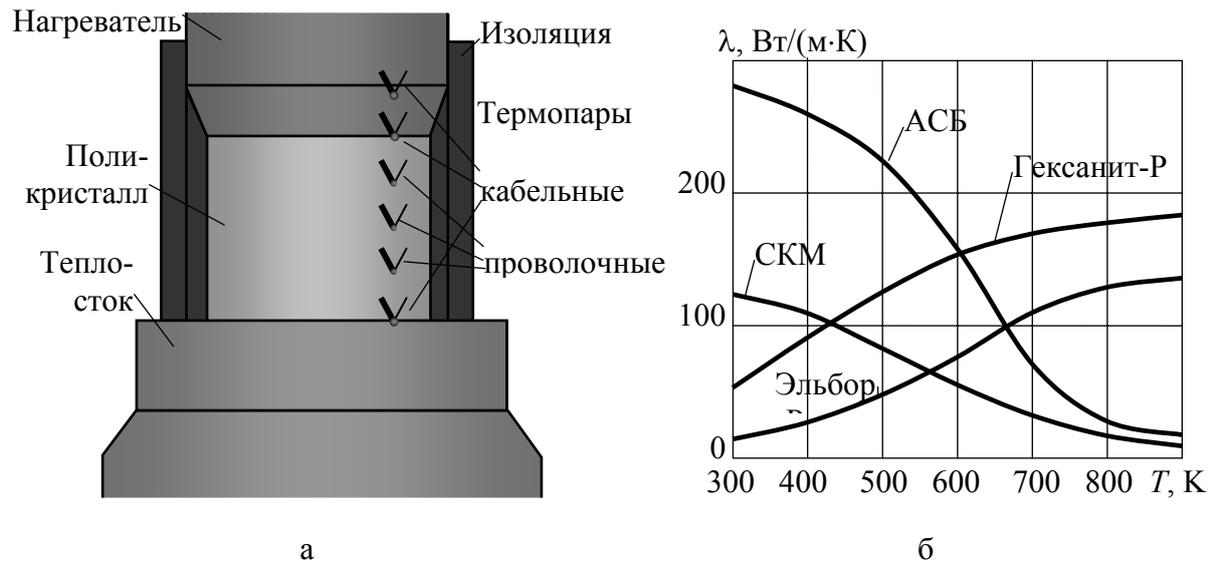


Рис. 3. Схема теплофизического эксперимента (а) и результаты его обработки (б) при определении теплопроводности сверхтвердых поликристаллов путем решения обратной задачи теплопроводности

Даже если перед началом моделирования теплофизические характеристики вовлеченных в моделируемый процесс материалов уже известны, например, из справочной литературы, они часто нуждаются в преобразовании в более удобную форму представления. Табличные дискретные данные мало подходят для использования в процессе моделирования. Их надо представить в виде аналитических функций. Но при этом нельзя забывать, что излишне гибкая процедура аппроксимации таблично заданной зависимости может привести к неудовлетворительному результату из-за наличия ненулевой погрешности получения таких табличных данных. Другими словами, алгоритм приближения аналитической зависимостью должен быть регуляризирующим.

Для аппроксимации температурных зависимостей теплопроводности и удельной массовой теплоемкости шлифуемых материалов мы используем регуляризирующую процедуру, которая была разработана нами для решения обратных задач теплопроводности [2]. При разработке такого способа аппроксимации преследовались следующие цели, формализованные в алгоритме в виде соответствующих критериальных (целевых) функций или условий, представленных в виде неравенств, -: получить наилучшее аналитическое приближение входных табличных данных в виде гладкой одиночной функции, выполнить условие максимальной устойчивости такого приближения путем согласования порядка приближающей функции с погрешностью исходных дискретных данных и выполнить условие максимальной гладкости такой функции.

Этим целям служит следующая последовательность алгоритмических действий:

предварительная аппроксимация с использованием полинома Чебышева минимального (нулевого) порядка;

минимизация среднеквадратичной относительной невязки между значениями табличной функции и теми, которые получены в результате функционального приближения при тех же табличных температурах;

сравнение минимального значения полученной невязки со среднеквадратичной погрешностью измерения исходных данных (значений таблично заданной функции);

увеличение порядка полинома на единицу, если эта погрешность меньше минимальной невязки, что в случае полинома нулевого порядка происходит практически всегда;

повторение минимизации функционала невязки с увеличенным порядком полинома;

продолжение такой последовательности действий до тех пор, пока порядок полинома не станет равным числу узлов таблицы, или минимум невязки не станет равным или меньшим погрешности исходных данных; когда это случится, первые две из указанных выше целей будут достигнуты;

выполнение блоков, осуществляющих регуляризацию решения путем поиска такого набора полиномиальных коэффициентов, при которых не только достигается равенство значений указанной невязки и погрешности, но и обеспечивается максимальная гладкость аппроксимирующей кривой (как известно, среди кривых одного и того же порядка наиболее гладкой будет та из них, у которой длина вектора коэффициентов будет минимальной), для чего нужно минимизировать еще один функционал, величина которого пропорциональна среднеквадратичному значению относительных величин полиномиальных коэффициентов;

проверка основного условия регуляризации: для любого набора коэффициентов невязка между табличными и сглаженными значениями идентифицируемой функции не должна быть меньше погрешности исходных данных; если результат этой проверки положителен, значит, получен конечный регуляризованный результат идентификации таблично заданной функции полиномами Чебышева.

В некоторых случаях теплотехнических исследований неизвестные, но необходимые для проведения моделирования величины, например параметры граничных условий, могут быть рассчитаны на основе дополнительных термометрических данных об изучаемом процессе, но, к сожалению, не в случае изучения тепловых явлений при шлифовании. Очень трудно измерить температуры в так называемых опорных точках, необходимых для любого расчетного метода, включая методы решения обратных задач, путем термометрирования шлифуемого изделия в тех реальных технологических и тепловых условиях, параметры которых затем должны быть идентифицированы.

Некоторые другие параметры математической модели теплового процесса, сопутствующего шлифованию, могут быть получены из иного, менее сложного, эксперимента, сохраняя при этом свои численные значения. Среди них – теплофизические свойства и их температурные зависимости. Они могут быть получены из специально спроектированного для этой цели теплофизического эксперимента, как тот, схема которого представлена на рисунке 3, а. Мы пользовались данными этого и подобных ему экспериментов для расчета теплопроводности и удельной массовой теплоемкости сверхтвердых синтетических абразивных материалов, как функции температуры [3]. При этом термометрическая информация, полученная от двух термопар (верхней и нижней), использовалась для задания граничных условий. Остальные термопары служили для получения данных в опорных точках. Еще одним источником данных (эталоном) был входящий в схему эксперимента нагреватель из меди, теплофизические свойства которой известны с высокой точностью.

Решение обратной задачи базировалось на той же алгоритмической схеме, что и процедура приближения табличных данных аналитической функцией, описанная выше. Совершенно непохожие, на первый взгляд, задачи (аппроксимация и идентификация) на самом деле отличаются друг от друга только внутренней структурой своих целевых

функций, минимизация которых является стратегическим стержнем решения обеих задач. Целевая функция в процедуре аппроксимации отражает влияние параметров аналитического представления аппроксимируемой таблично заданной теплофизической характеристики на усредненное отклонение аппроксимирующей функции от табличных данных. С другой стороны, функция цели в обратной задаче имеет те же аргументы, но вычисляет усредненное отклонение температур, полученных моделированием, от результатов термометрирования. Такие различия в целевых функциях несущественны для построения как самого процесса минимизации, так и процедуры регуляризации корректного решения, поэтому соответствующие алгоритмы могут быть идентичными.

Для минимизации мы используем алгоритм Нелдера-Мида, описанный в [4], а для упрощения использования функций теплофизических свойств, получаемых по нашему методу, рассчитанные коэффициенты полиномов Чебышева преобразуются в коэффициенты обыкновенных степенных полиномов, как это предлагается делать в [5].

## 2D-моделирование

Рассмотрим моделирование температурного поля, возникающего при шлифовании металлической детали, имеющей форму прямоугольной пластины, с помощью цилиндрической поверхности шлифовального круга, как показано выше на рис. 1.

Соотношение размеров режущего инструмента и обрабатываемой детали, а также специфика граничных тепловых воздействий обуславливают такой характер тепловых процессов, при котором изменениями температуры в детали вдоль оси вращения круга можно пренебречь. В этих обстоятельствах постановка задачи, описываемая двумерным уравнением теплопроводности является вполне приемлемой.

Выделение тепла в зоне резания моделировалась введением на обрабатываемой стороне детали источника с плотностью теплового потока в форме повторяющихся импульсов (рис. 4). Это основной, определяющий элемент входных данных. Частота повторения импульсов и их скважность рассчитывалась по концентрации абразивных зерен и скорости вращения шлифовального круга. При этом амплитуда этих импульсов  $q^*$  вычислялась, исходя из силы резания, определяемой экспериментально или рассчитанной по режимным параметрам шлифования.

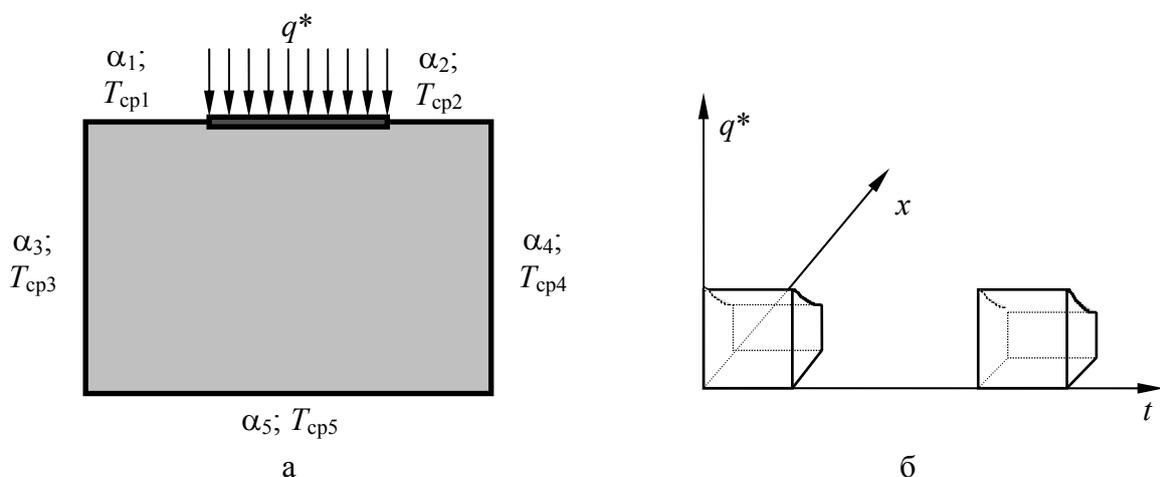


Рис. 4. Схема теплофизического эксперимента (а) и результаты его обработки (б) при определении теплопроводности сверхтвердых поликристаллов путем решения обратной задачи теплопроводности

Алгоритм определения температурного поля шлифуемой детали строился на основе конечно-разностного метода. Вычисления представляли собой итерационное решение системы конечно-разностных уравнений с использованием верхней релаксации, показатель которой подбирался автоматически.

Полученные результаты позволяют проследить ход прогрева материала на разных расстояниях от зоны резания, оценить градиенты, моменты достижения температурой в заданной точке критического значения и т. п.

Для проведения численных экспериментов были выбраны следующие значения исходных параметров. Во всех случаях моделировалась обработка шлифованием материала с теплопроводностью  $5,5 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$  и теплоемкостью  $3,5\cdot 10 \text{ Дж/(м}^3\cdot\text{К)}$ . Обрабатываемая деталь имела сечение  $5\times 10 \text{ мм}$ . Охлаждение детали осуществлялось средой с температурой  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  при коэффициенте теплоотдачи  $50 \text{ Вт/(м}^2\cdot\text{К)}$ . В контактной зоне шириной  $0,75 \text{ мм}$  с периодичностью  $\Delta t_p = l_p/V_{кр}$  ( $l_p$  – среднее расстояние между режущими зернами) и скважностью  $L_k / (V_{кр}\cdot\Delta t_p)$  возникает тепловой источник с мощностью, которая определяется по зависимости

$$q^* = \frac{\bar{p}_z \cdot (V_{кр} + V_d) \cdot m}{L_k},$$

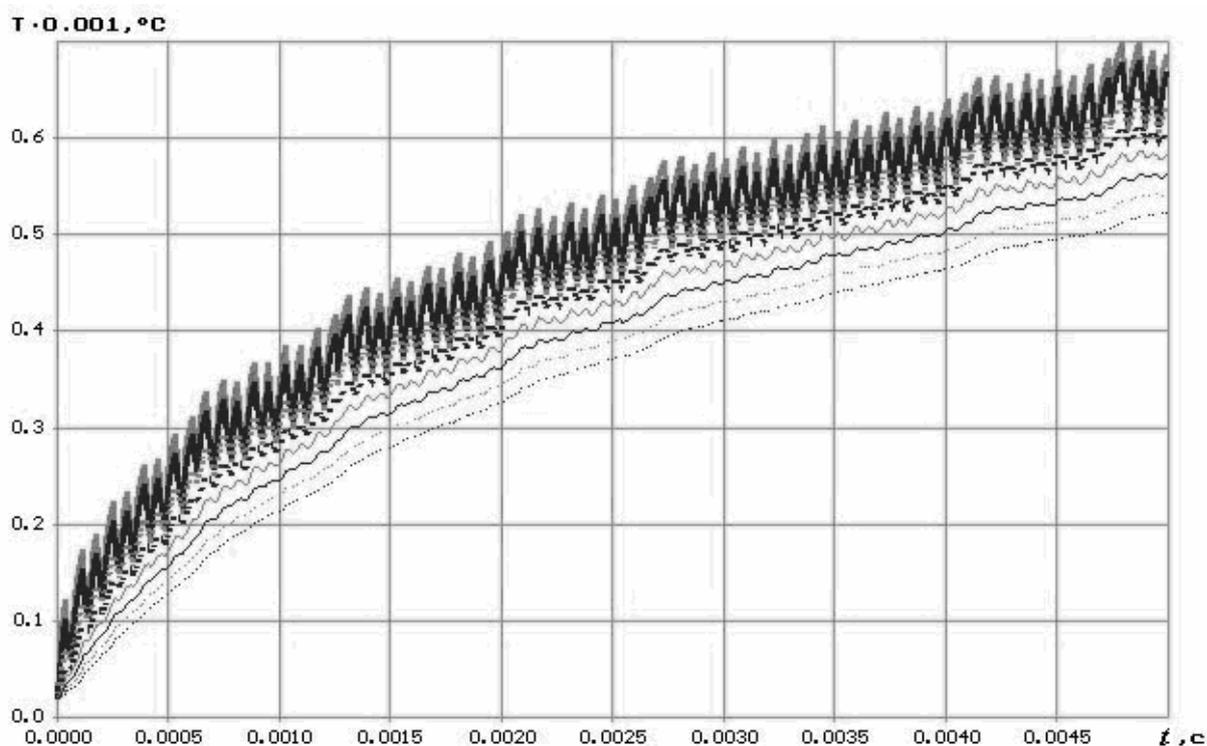
где  $\bar{p}_z$  – средняя удельная тангенциальная составляющая силы резания;  $V_{кр}$  – скорость вращения абразивного круга;  $V_d$  – скорость вращения детали;  $m$  – доля механической энергии, переходящей в тепло;  $L_k$  – длина дуги контакта абразивного круга с обрабатываемой поверхностью.

В работе [6] экспериментально установлен факт влияния скорости  $V_d$  на удельные значения энергосиловых параметров процесса круглого врезного шлифования. Показано, что при достижении этой скоростью значений, при которых выполняются условия обеспечения адсорбционно-пластифицирующего эффекта [7], удельные значения энергосиловых параметров процесса круглого шлифования снижаются в 1,5 - 3 раза. Поэтому представляет интерес оценка степени влияния технологических параметров процесса шлифования на тепловое состояние зоны резания.

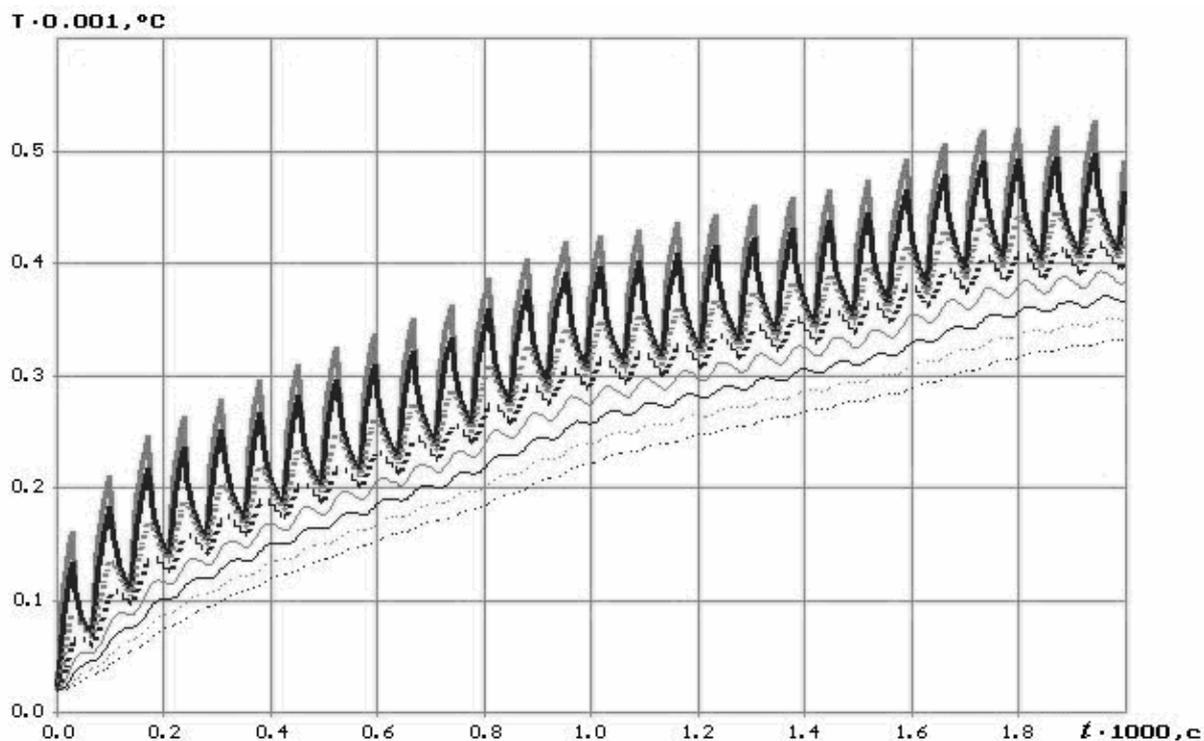
В проведенных численных исследованиях среднее значение удельной тангенциальной составляющей силы шлифования  $\bar{p}_z = 8\cdot 10^3 \text{ Н/м.}$ , линейная скорость вращения абразивного круга диаметром  $D = 0,6 \text{ м}$  была  $V_{кр} = 35 \text{ м/с}$ ;  $m = 0,3$  [6], линейная скорость вращения изделия диаметром  $d = 0,1 \text{ м}$  определялась из зависимости  $V_d = \pi d N_d$ , где частота вращения детали  $N_d$  принимала значения 50, 100, 200, 300...900 об/мин. Длина дуги контакта  $L_k$  определялась из зависимости  $L_k = \sqrt{60 \cdot D d S_n / [(D + d) \cdot N_d]}$ . Значение радиальной подачи на врезание  $S_n = 2\cdot 10^{-5} \text{ м/с}$ . Среднестатистическое расстояние между режущими абразивными зернами  $l_p = 2,5\cdot 10^{-3} \text{ м}$ .

Результаты решения задачи приведены в виде графиков изменения контактной температуры на глубине 0; 5; 15; 25; 35; 45; 55; 65 мкм (рис. 5). Анализ результатов показывает, что максимальное значение температуры характерно для тех режимов, в которых  $V_d$  не превышает 40 м/мин. При этом температура может достигать значений порядка 500 - 600  $^\circ\text{C}$ . С изменением линейной скорости

вращения обрабатываемой детали в диапазоне  $V_d = 1 \dots 4,7$  м/с количество тепловых импульсов, воздействующих на контактную зону, уменьшается до одного при тех значениях  $V_d$ , когда выполняется требование [7].



а



б

Рис. 5. Температуры на глубине 0; 5; 15; 25; 35; 45; 55; 65 мкм от поверхности в зоне резания при круглом врезном шлифовании с линейной скоростью вращения изделия 0,26 м/с (а) и 0,52 м/с (б)

Дальнейшие исследования показали, что кинематические параметры процессов шлифования, в частности скорость перемещения обрабатываемой поверхности относительно абразивного инструмента, оказывают решающее влияние на температуру контактной зоны. А при обеспечении условий проявления адсорбционно-пластифицирующего эффекта температура в зоне резания снижается в 3,5 - 6 раз и не превышает 150 °С для круглого шлифования без охлаждающих жидкостей и 60 °С – для планетарно-сопряженного. Это позволяет полностью исключить вероятность возникновения трещин и прижогов и упростить требования к выбору смазочно-охлаждающей технологической среды.

### 3D-моделирование

Торцевое шлифование чашечными кругами характерно для заточки сверхтвердых вставок токарного инструмента. Рассмотрим моделирование заточки двух типов заготовок такого инструмента.

В случае моделирования процесса шлифования первого типа объектом исследования являлся нестационарный теплоперенос в поликристалле синтетического амалоподобного материала и окружающей его стальной оправке. Такой процесс характерен для заточки поликристаллов указанного типа алмазным шлифовальным кругом при изготовлении режущего инструмента (см. рис. 2, а).

Часть исходной информации, необходимой для моделирования температурного поля в поликристалле и его оправке, была получена расчетным путем на основе режимных параметров шлифования, а также из баз данных. Кроме того, удалось получить информацию о температурных условиях в зоне резания исключительно экспериментальным путем. В эксперименте температуры в зоне резания фиксировались с помощью пирометра через отверстие в шлифовальном круге.

Приведенные результаты моделирования исследуемого температурного поля (рис. 6) соответствуют скорости вращения круга в 30 об/с, продольной подачи в 1 м/мин, поперечной – 0,03 мм на двойной проход и коэффициенту теплообмена у поверхности в 50 Вт/(м·К).

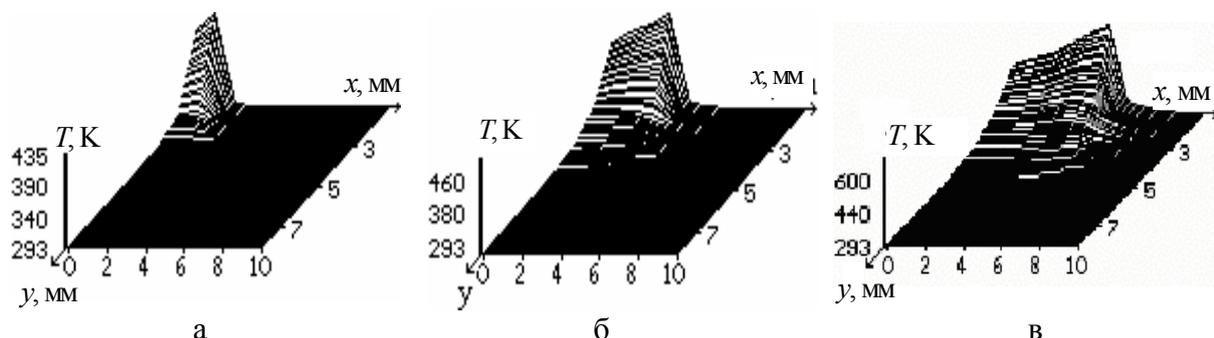


Рис. 6. Температуры вблизи зоны резания в моменты 0,06 (а); 0,18 (б) и 0,30 с (в) от начала шлифования

Задача, подобная описанной выше, была решена с помощью пакета программ PHOENICS фирмы CHAM Ltd, Великобритания. Это средство моделирования построено в соответствии с методом контрольных объемов, теоретические и практические аспекты которого описаны в книге [8]. Результаты моделирования для начальных стадий процесса шлифования приведены на рис. 7.

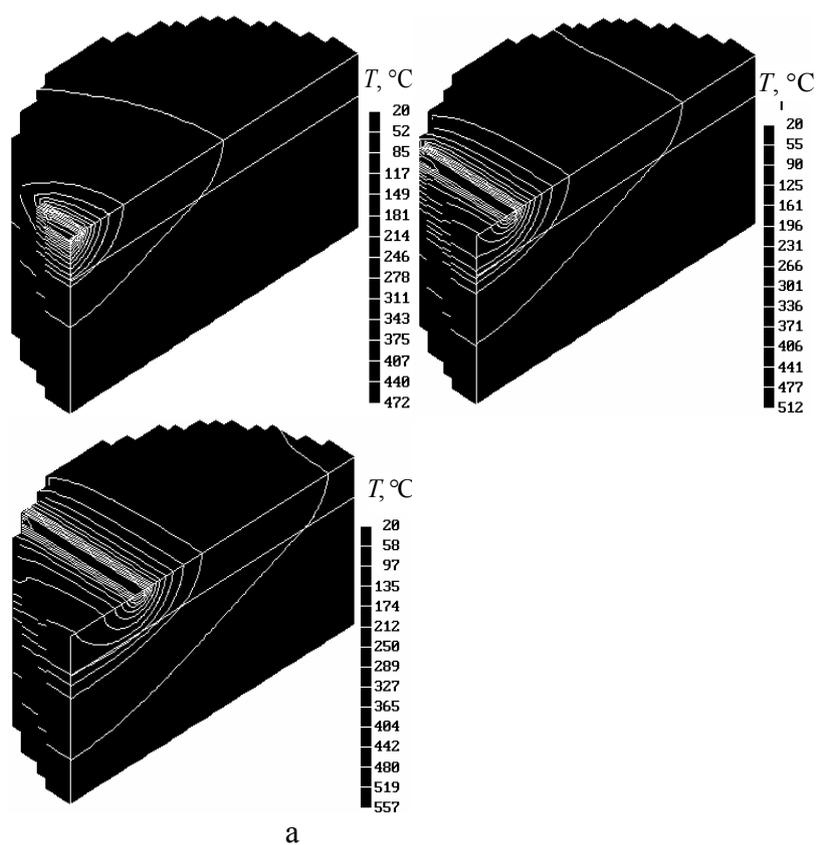


Рис. 7. Изотермы в шлифуемой двухслойной композиции для времени 0,05 (а); 0,15 (б) и 0,25 с (в)

## Заклучение

Хотя математическое моделирование и позволят существенно упростить и в конечном счете интенсифицировать исследования тепловых явлений при шлифовании, оно вряд ли окажется успешным без привлечения данных, полученных в эксперименте. Это объясняется как сложностью самого технологического процесса, так и пробелами в его полном математическом описании. В этих обстоятельствах предварительная обработка исходной информации становится важным элементом всего процесса моделирования.

Новизна проведенных исследований определяется новой методикой получения и обработки исходных данных для моделирования, основанной на технике решения обратных задач, и самими процедурами моделирования, которые в одних случаях являются разработанным нами программным обеспечением, а в других – используют возможности моделирующего программного комплекса PHOENICS. Получены данные, позволяющие оценить влияние тепловых факторов на качество шлифования.

## Литература

- [1]Резников А. Н. Теплофизика процессов механической обработки материалов. М.: Машностроение, 1981. – 279 с.
- [2]Мацевитый Ю. М., Лушпенко С. Ф. Идентификация теплофизических свойств твердых тел. Киев: Наук. думка, 1990. – 216 с.
- [3]Грабченко А. И., Лушпенко С. Ф., Мацевитый Ю. М., Островерх Е. В. Зависимость коэффициента теплопроводности поликристаллических сверхтвердых материалов от температуры // Сверхтвердые материалы. – 1986. - № 1. - С. 24-27.

- [4]Химмельблау Д. Прикладное нелинейное программирование. – М.: Мир, 1975. – 534 с.
- [5]Пашковский С. Вычислительные применения многочленов и рядов Чебышева. М.: Наука, 1983. – 384 с.
- [6]Сурду Н. В., Долматов А. И. и др. Влияние скорости круговой подачи и катодной поляризации обрабатываемой поверхности на эффективность круглого врезного шлифования // Вопросы проектирования и производства летательных аппаратов. – Харьков: НАКУ "ХАИ", 2000. – Вып. 21 (4) . – С. 130 - 140.
- [7]Сурду Н. В. Адсорбционное влияние сред при шлифовании // Пробл. машиностроения. – 1999. – Т. 2. – №1-2. – С.106-113.
- [8]Патанкар С. Численные методы решения задач теплообмена и динамики жидкости. М.: Энергоатомиздат, 1984. – 150 с.