

**Ключевые слова:**

твердые хрупкие кристаллические материалы, шлифование, квазипластичность, термические напряжения, тепловые поля

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕПЛОВЫХ ПРОЦЕССОВ ПРИ ПОВЕРХНОСТНОЙ ОБРАБОТКЕ ТВЕРДЫХ ХРУПКИХ МИНЕРАЛОВ В РЕЖИМЕ КВАЗИПЛАСТИЧНОСТИ

Татьяна ТЕПЛОВА

Рассмотрен механизм взаимодействия зерен шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью твердого хрупкого минерала. Представлен расчет распределения температуры в образце, необходимый для расчета масштабов его теплового расширения. Описаны экспериментальные зависимости температуры отдельных участков образца при обработке от изменения врезной подачи и скорости прохода стола станочного модуля.

Посвящается памяти моих учителей Анатолия Сергеевича Коньшина и Олега Михайловича Гридина

Перспективным способом получения высококачественной поверхности твердых хрупких кристаллических материалов нанометрового рельефа является удаление поверхностного слоя в режиме квазипластичности (см.: СТАНКОИНСТРУМЕНТ, 2021, № 1 (022), с. 48–55).

Под квазипластичностью в данном случае понимается проявление поверхностным слоем твердых хрупких материалов пластичных свойств при обработке. Этот эффект позволяет реализовать технологию квазипластичной обработки твердых материалов, обеспечивая механическое воздействие на обрабатываемую поверхность (ОП) материала при подаче шлифовального круга (ШК), составляющей доли мкм/ход. При этом поверхностный слой хрупких твердых материалов проявляет пластичные свойства и преобладающим механизмом становится не хрупкое разрушение, а квазипластичное удаление поверхностного слоя (ПС) материала.

Режим квазипластичности при обработке достигается за счет обеспечения жесткости конструкции упругой обрабатывающей системы и относительной изоляции от внешних возмущений. В результате заготовки из хрупких материалов можно механически обрабатывать в регулируемом режиме с получением обработанной поверхности нанометрового рельефа.

Теоретические исследования и анализ экспериментальных исследований квазипластичного удаления поверхностного слоя при обработке различных твердых хрупких материалов позволили составить классификацию состояния поверхностного слоя материала при его механической обработке по величине удельной энергии воздействия. Также была разработана физико-математическая модель квазипластичного удаления поверхностного слоя при прецизионной обработке твердых хрупких кристаллических минералов. Научно-методические подходы формирования физико-математической модели основывались на корректности оценки пре-

дельных параметров напряженно-деформируемого состояния, используемых для решения задач хрупкого разрушения, включая использование критериев прочности и пластичности анизотропных твердых тел, элементов теории дислокаций, основных положений термодинамики и физической мезомеханики. Физическая мезомеханика исследует вопросы, находящиеся на стыке физики твердого тела и механики деформируемого твердого тела [2].

Термин «мезоскопический» (мезообъем) в физической мезомеханике отражает смысл «промежуточный» между твердым телом как сплошной средой и его конкретной кристаллической решеткой. При рассмотрении объекта исследования малой величины (примерно 0,5–0,05 нм) допускается применение как элементов классических уравнений напряженно-деформируемых состояний механики сплошной среды, так и элементов теории дислокаций. В условиях нагружения согласно положениям физической мезомеханики поверхностный слой обрабатываемого материала рассматривается как самостоятельный (мезоскопический) структурный уровень деформации, который имеет более высокую концентрацию дефектов и пониженный предел сдвиговой устойчивости по сравнению с основным объемом материала [3].

Рассмотрим суть механизма взаимодействия алмазных зерен шлифовального круга с обрабатываемой поверхностью твердого хрупкого минерала, обладающего микронеровностями, при его поверхностной обработке [9]. Во время упругого взаимодействия выступов, согласно релаксационной модели мезомеханики, любая точка в деформируемом твердом теле испытывает сдвиг. В точке соприкосновения выступов шлифовального круга и обрабатываемой поверхности кристаллического минерала происходит локальная потеря сдвиговой устойчивости кристаллической решетки. Происходит движение дефектов в кристалле, в результате которого первоначальный концентратор напряжений релаксирует, и распределение напряжений в кристалле становится более однородным.

В исходном высокопрочном кристалле в ходе квазипластической деформации возникают множественные дефекты структуры. Кристалл снижает свою прочность, но сохраняет сплошность. Сдвиг на микроуровне сопровождается поворотными деформациями на мезоскопическом масштабном уровне. На мезоуровне носителями квазипластического течения являются структурные элементы – мезообъемы. Формирование движущихся в релаксационном режиме мезообъемов происходит в основном в поверхностном слое обрабатываемого минерала, имеющем большую дефектность, в направлении максимальных касательных напряжений. Релаксация одних напряжений в процессе возвратно-поворотных колебаний сопровождается генерацией других внутренних

Таблица 1. Классификация энергетических уровней состояния поверхностного слоя минералов при механическом воздействии

| Состояние поверхностного слоя твердого минерала при механическом воздействии | Диапазон удельной величины энергии воздействия, W , Дж·м ⁻³ |
|--|--|
| При механической обработке хрупкое разрушение | $W > \frac{\sigma_p^2}{2 \cdot E}$ |
| Режим «квазипластичности» | $\frac{\tau_n^2}{2 \cdot E} < W < \frac{\sigma_p^2}{2 \cdot E}$ |
| Упругое деформирование материала | $W < \frac{\tau_n^2}{2 \cdot E}$ |

Примечание: E – модуль упругости, Па;
 τ_n – предел Пайерлса, Па;
 σ_p – предел прочности на растяжение, Па

напряжений. Удаление поверхностного слоя происходит под действием усталостных напряжений возвратно-поворотных мод (механизмов) деформации. При этом образуется обработанная поверхность нанометровой шероховатости с минимальным количеством дефектов, внесенных процессом обработки. Режим квазипластичного удаления поверхностного слоя хрупких минералов можно обеспечить при специальном подборе таких параметров, как усилие прижима и скорость движения инструмента параллельно поверхности кристалла, подвергаемой механическому воздействию.

При снижении контактных напряжений величина энергии воздействия может быть недостаточна для проявления пластических свойств хрупких кристаллов, обусловленных движением дислокаций, если напряжения меньше предела Пайерлса (τ_n), соответствующего началу движения дислокаций. Режим квазипластичного удаления поверхностного слоя должен лежать в диапазоне энергий, превышающих энергию воздействия, соответствующую пределу Пайерлса, и быть меньше величины энергии, соответствующей хрупкому разрушению (определяемой, например, в работе [4]).

С учетом вышеизложенного, сформирована классификация энергетического воздействия, позволяющая распределять эффекты, возникающие в поверхностном слое твердого минерала при механическом воздействии (табл. 1).

Сравнение величины минимальной и максимальной допустимых энергий воздействия показывает, что величина энергии воздействия, соответствующая началу пластических деформаций в твердых минералах, более чем на пять порядков меньше, чем энергия воздействия хрупкого разрушения. Широкий интервал энергетического диапазона квазипластичного разрушения поверхностного слоя твердых

минералов затрудняет задачу выбора оптимального режима механического воздействия.

Для моделирования поверхности нанометрового микрорельефа рассмотрено послойное квазипластическое удаление поверхностного слоя под действием усталостных напряжений возвратно-поворотных мод деформации. Задача решается в плоском приближении. Пусть δ – подача шлифовального круга по вертикали, м. Если $\delta < h$, где h – высота выступа образца (шероховатость R_z , м), то столкновения выступов обрабатываемой поверхности образца с зернами шлифовального круга будут происходить в слое толщиной δ (рис. 1). На начальном этапе размер алмазных зерен шлифовального круга соизмерим с размером микронеровностей обрабатываемого материала (20 мкм). На заключительных этапах шлифования размер зерен шлифовального круга значительно превышает оставшиеся микронеровности, составляющие 2–10 нм. Примем средний диаметр части выступов алмазных зерен шлифовального круга, вступающих во взаимодействие с обрабатываемой поверхностью, и части зерен шлифовального круга, попавших в этот слой, $d \sim \delta/2$. Согласно предложенной модели при выбранном шаге подачи (δ_0) за цикл снимается слой δ_0 , но нижняя часть (впадины) шероховатости перемещается на $2\delta_0$ до тех пор, пока подача не достигнет порядка высоты выступов (шероховатости R_z). На это необходимо k_1 циклов, $k_1 = \left| \frac{h_0}{2\delta_0} \right| - 1$, где $\left| \frac{h_0}{2\delta_0} \right|$ – целая

часть выражения. С этого момента усилие прижима инструмента (вертикальная врезная подача инструмента) должно уменьшаться. При уменьшении подачи по заданному закону $\delta_{k_2} = \frac{\delta_0}{2^{k_2}}$ уменьшение усилия

прижима будет продолжаться до тех пор, пока подача инструмента не сравняется с технически достижимой подачей шлифовального круга по вертикали δ_{min} . Общее число шагов, исчерпывающих технические возможности шлифовального станка, равно:

$$k = \left| \frac{h_0}{2\delta_0} \right| - 1 + \frac{\ln\left(\frac{\delta_0}{\delta_{min}}\right)}{\ln 2}.$$

Исходя из заданной шероховатости и минимально возможной врезной подачи станка, можно вычислить число снимаемых слоев, время, необходимое для доведения заготовки до заданной шероховатости, и выбрать рациональный режим обработки.

Оценка минимального размера шероховатости, который возможно получить на используемом оборудовании, исходит из технически достижимой подачи ШК по вертикали – δ_{min} . Высота получаемого выступа шероховатости $h_e \sim \delta_{min}/2 + \delta_{тепл}/2$. Дальнейшего снижения шероховатости при квазипластичном удалении ПС можно добиться при нуле-

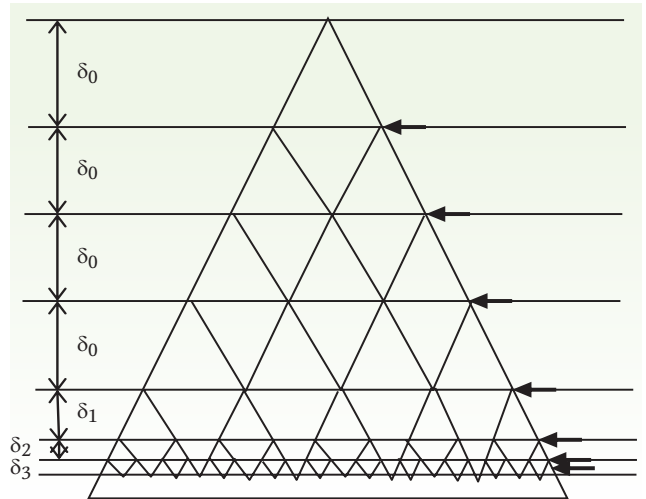


Рис. 1. Схема удаления ПС образца при квазипластичной обработке

вой подаче инструмента, создавая усилия прижима за счет теплового расширения образца. Оценочное значение минимальной шероховатости R_z :

$$h_{min} \sim \delta_{тепл}/2,$$

$$\delta_{тепл} = \beta \cdot H \cdot \Delta T_{ср},$$

где β – средний коэффициент линейного расширения материала образца, K^{-1} ; H – толщина образца, м; $\Delta T_{ср}$ – разница между интегральной средней температурой обрабатываемой поверхности и температурой окружающей среды, K .

Влияние теплового фактора является наиболее существенным при удалении поверхностного слоя минерала в режиме квазипластичности. Его рост при жестком закреплении образца будет приводить к необходимости снижения начального усилия прижима, что обусловлено тепловым расширением образца и увеличением подвижности дефектов в энергетической области квазипластичности [10].

Схематично система «инструмент – обрабатываемый материал» представлена на рис. 2. Введенная энергия в данной системе расходуется на работу силы трения. В процессе обработки образца происходит периодический нагрев в зоне обработки и пассивное воздушное охлаждение образца при выходе из зоны обработки. При увеличении поступления теплового потока в результате работы силы трения $A_{тр}$ происходит нагрев образца и распространение теплового потока вдоль оси Z образца. Под действием теплового потока q с той же периодичностью вследствие теплового расширения возрастает усилие прижима кристалла к шлифовальному кругу. Чтобы не допустить скола минерала, необходимо рассчитать предельно допустимое усилие прижима и установить зависимость

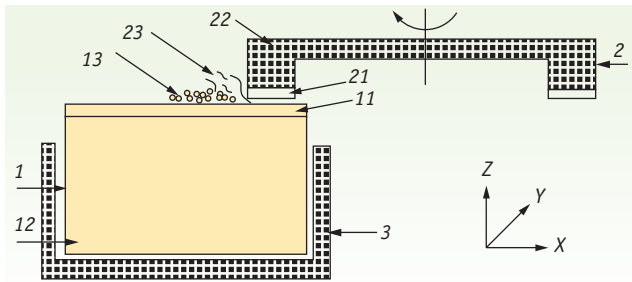


Рис. 2. Система «инструмент – обрабатываемый материал»: 1 – образец; 11 – поверхностный слой образца; 12 – внутренний объем образца; 13 – пыль от обработки образца; 2 – шлифовальный круг; 21 – поверхностный слой шлифовального круга; 22 – внутренний объем шлифовального круга; 23 – пыль от шлифовального круга; 3 – державка

его изменения в процессе обработки от величины поступающего теплового потока. Для расчетов необходимо знать зависимость коэффициента теплового линейного расширения от температуры и для каждого обрабатываемого минерала определять критическую температуру, при которой тепловой поток в образце достигнет критического значения [7].

Точный аналитический расчет распределения температуры в образце, необходимый для расчета масштабов его теплового расширения, затруднен вследствие неточности в определении тепловых параметров на границах образца в процессе обработки. Технически проще измерять температуры «горячей» и «холодной» поверхностей, а не тепловые потоки. В качестве первого приближения распределение температуры можно определить, решая известное дифференциальное уравнение теплопроводности для неограниченной пластины с периодическими граничными условиями первого рода. Сделав замену переменных и рассматривая изменения температуры поверхности в безразмерных координатах (рис. 3), получим уравнение и граничные условия в безразмерном виде:

$$\frac{\partial \theta}{\partial Fo} = \frac{\partial^2 \theta}{\partial \xi^2},$$

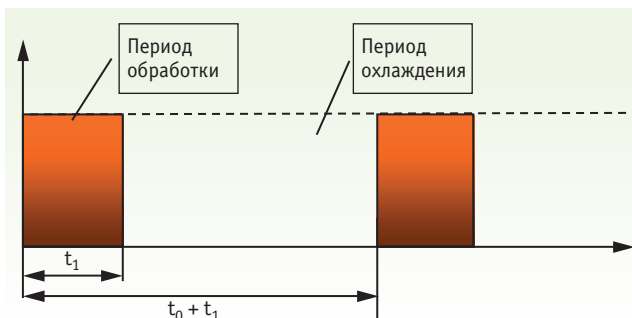


Рис. 3. Схема изменения безразмерной температуры поверхности образца при его обработке

Если $\xi = 0$, то $\theta = 1$ при $0 \leq Fo \leq Fo_1$; $\theta = 0$ при $Fo_1 \leq Fo \leq Fo_0$.

Если $\xi = 1$, то $\theta = 0$ при

$$Fo = \frac{\alpha \tau}{h^2}, \quad Fo_0 = \frac{at_0}{h^2}, \quad Fo_1 = \frac{at_1}{h^2}, \quad Fo_2 = \frac{a(t_0 - t_1)}{h^2}, \quad \theta = \frac{T - T_0}{T_1 - T_0},$$

где Fo – текущее значение критерия Фурье; a – температуропроводность; τ – текущее время; h – толщина образца; t_1 – длительность периода нагрева; t_0 – длительность периода охлаждения; $(t_0 + t_1)$ – время от начала одного цикла нагрева до начала другого периода нагрева; Fo_1, Fo_0 – соответствующие значения критерия Фурье; ξ – безразмерная координата; θ – безразмерная температура; x – текущая координата; T_0 – начальная температура среды; T_1 – температура поверхности нагрева при $x = h$.

Применяя описанное Г. Карслоу и Д. Егером квазистационарное асимптотическое решение данного уравнения при $n \rightarrow \infty$ можно рассчитать безразмерную температуру для периода нагрева в период обработки ($0 \leq \tau \leq t_1$) и периода охлаждения (при выходе обрабатываемого образца из-под круга). Подставляя данные для обрабатываемого материала, можно получить зависимость безразмерных температуры и координаты обрабатываемого образца от времени обработки [10].

Например, при исходных данных:

→ для лейкосапфира: $\alpha = 8 \cdot 10^{-7} \text{ м}^2/\text{с}$, $h = 0,02 \text{ м}$, $\tau_1 = 0,5 \text{ с}$, $t_0 = 5 \text{ с}$, $Fo_0 = 10^2$, $Fo_1 = 10^{-3}$, $Fo_2 = 0,9 \cdot 10^{-2}$;

→ для алмаза: $\alpha = 4,85 \cdot 10^{-4} \text{ м}^2/\text{с}$, $h = 0,002 \text{ м}$, $\tau_1 = 0,5 \text{ с}$, $t_0 = 5 \text{ с}$, $Fo_2 = 550$, $Fo_1 = 60$, $Fo_0 = 600$.

Графическое изображение температурных процессов при квазипластичном удалении поверхностного слоя минералов приведено на рис. 4, 5.

При рассмотрении тепловых процессов, сопровождающих обработку в режиме квазипластичности, разработаны критериальные зависимости, определяющие условия, при которых процесс обработки не будет переходить из области квазипластичности в область хрупкого разрушения [8].

Критерий хрупкого термического разрушения характеризует устойчивость минерала к хрупкому термическому разрушению.

Возникающие в процессе обработки минерала термические напряжения σ_T под действием нормальной составляющей силы прижима, определяемой врезной подачей, не должны превосходить предел прочности минерала на сжатие. Используя формулу, описанную в работе [1], дополнительно учитывая зависимость коэффициента теплового расширения материала от температуры, получаем:

$$\sigma_T = \frac{E \cdot \beta_0}{2 \cdot (1 - \mu)} \cdot \left[\Delta T + \frac{k \cdot \Delta T^2}{2} \right] < \sigma_{сж},$$

где β – коэффициент линейного теплового расширения материала образца, K^{-1} ; μ – коэффициент Пуассона; E – модуль Юнга, Па; $\Delta T = T - T_0$, T – тем-

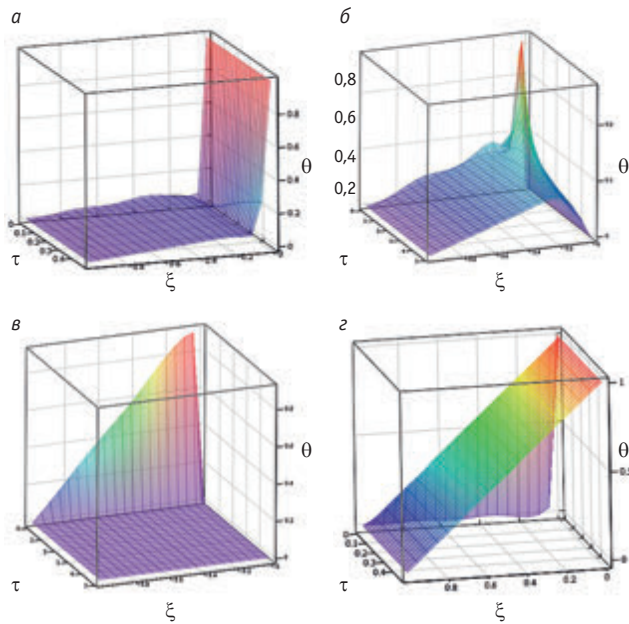


Рис. 4. Зависимость безразмерной температуры и координаты образца от времени: а – в период обработки лейкосапфира, б – в период охлаждения лейкосапфира, в – в период обработки алмаза, г – в период охлаждения алмаза

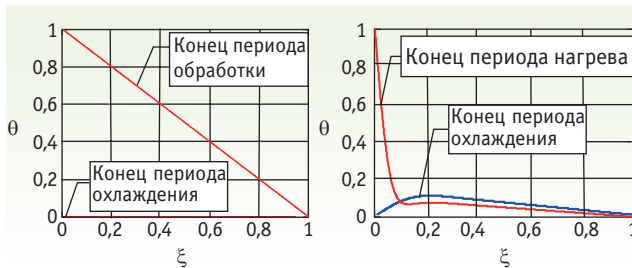


Рис. 5. Зависимость безразмерной температуры образца от координаты:

- ✓ средняя безразмерная температура в конце периода нагрева алмаза 0,5;
- ✓ средняя безразмерная температура в конце периода охлаждения алмаза 0,0;
- ✓ средняя безразмерная температура в конце периода обработки лейкосапфира 0,077;
- ✓ средняя безразмерная температура в конце периода охлаждения лейкосапфира 0,042

пература образца; K , T_0 – температура среды, K ; β_0 – коэффициент линейного теплового расширения при 20°C .

В первом приближении:

$$\beta = \beta_0(1 + k\Delta T).$$

В результате критерий хрупкого термического разрушения для монокристаллов можно выразить как:

$$k_{\text{хтрм}} = \frac{E \cdot \beta_0}{2 \cdot (1 - \mu) \cdot \sigma_{\text{сж}}} \cdot \left[\Delta T + \frac{k \cdot \Delta T^2}{2} \right] < 1.$$

Для поликристаллов термическое разрушение происходит прежде всего за счет разницы между коэффициентами теплового расширения соседних микрокристаллов β_1 и β_2 . Тогда критерий термического разрушения поликристаллов:

$$k_{\text{хтрм}} = \frac{E_1 \cdot E_2 \cdot \left[(\beta_2 - \beta_1) \Delta T + \frac{\beta_2 \cdot k_2 - \beta_1 \cdot k_1}{2} \cdot \Delta T^2 \right]}{(E_1 + E_2) \cdot \tau_{\text{сд}}} < 1,$$

где E_1 и E_2 , k_1 и k_2 – модули Юнга и коэффициенты температурной зависимости коэффициента линейного теплового расширения соседних микрокристаллов.

Следующим критерием, характеризующим тепловое воздействие на обрабатываемый минерал при поверхностной обработке в режиме квазипластичности, является критерий сохранения формы k_ϕ (рис. 6).

В процессе обработки распределение тепла по обрабатываемому минералу происходит неравномерно. Благодаря внешнему охлаждению при обработке основному нагреву подвергается центральная часть ПС, непосредственно находящаяся в зоне обработки. Усилие прижима F_n и величина съема будут максимальными в центре образца. Толщина центральной части образца при охлаждении до исходной температуры уменьшается на величину Δh , м:

$$\Delta h = \Delta T_{\text{ср}} \cdot \beta \cdot h_0, \quad \Delta h < \delta,$$

где δ – величина подачи инструмента, м; h_0 – начальная толщина образца, м; $\Delta T_{\text{ср}}$ – разность между средней интегральной температурой образца в процессе обработки и температурой окружающей среды, K .

Основное условие получения ОП заданной неплоскостности будет иметь вид:

$$k_\phi = \frac{\Delta T_{\text{ср}} \cdot \beta \cdot h_0}{\delta} \approx 1.$$

При соответственном подборе режимов обработки, руководствуясь приведенными выше критериями хрупкого термического разрушения, можно обрабатывать минерал так, чтобы устранить негативное влияние теплового расширения минерала при поверхностной обработке.

При рассмотрении критерия хрупкого термического разрушения для выбора рациональных режимов квазипластичной обработки можно выделить ряд факторов, присущих обрабатываемому минералу, имеющих табличное значение, которые могут определяться до процесса обработки.

Аналогичные преобразования делаются для критерия термического хрупкого разрушения поликри-

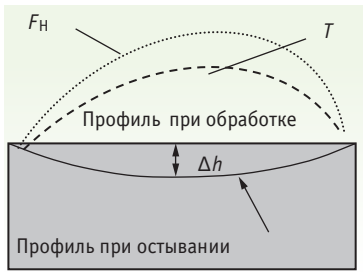


Рис. 6.
Форма минерала при обработке



Рис. 7.
Исследование температурных полей образца термографом ИРТИС-2000



сталлических минералов. В результате этих преобразований можно определить допустимые области изменения температуры при обработке в режиме квазипластичности для различных минералов. Вывод и значения постоянных факторов для лейкосапфира, алмаза и кварца приведены в работе [11].

За инструментальную часть проведения эксперимента была ответственна компания «ИРТИС» – ведущий российский производитель инфракрасных приборов для измерения и визуализации тепловых полей. С целью исследования зависимости температуры обрабатываемого кристалла от режимов обработки была проведена термографическая съемка процесса обработки термографом ИРТИС-2000 (рис. 7).

Термограф ИРТИС-2000 – прибор неразрушающего контроля, представляющий собой прецизионный оптико-механический сканирующий инфракрасный прибор для измерения и визуализации тепловых полей. Принцип работы ИРТИС-2000 основан на сканировании теплового излучения объекта, попадающего в его поле зрения. Используемый в нем высокочувствительный ИК-приемник воспринимает прошедший поток и преобразует его в электрический сигнал, который в дальнейшем с помощью аналого-цифрового преобразователя становится цифровым. Основные преимущества термографов ИРТИС-2000:

- высокая точность измерения абсолютных температур;
- равномерность чувствительности по всему полю изображения;
- стабильность характеристик во времени;
- полная компенсация температурного дрейфа в каждом кадре, отсутствие оптики на входе позволяют термографу ИРТИС-2000 моментально адаптироваться к окружающей среде и проводить точные измерения при любых температурах и их изменениях.

Эксперимент был проведен на образце-монокристалле искусственного лейкосапфира цилиндрической формы диаметром 31,5 мм и высотой 16,8 мм.

В процессе эксперимента:

- меняли скорость продольного прохода стола станочного модуля АН15ф4 при сохранении неизменным значения врезной подачи (исследования проводились на трех различных скоростях продольного прохода стола станочного модуля);

- меняли врезную подачу «инструмент – обрабатываемый минерал» при сохранении постоянной скорости продольного прохода стола станочного модуля.

Измерения температуры снимали с боковой поверхности кристалла с частотой разрешающей способности прибора при непрерывном процессе шлифования в режиме квазипластичности. При температурном исследовании верхней грани кристалла (обрабатываемой поверхности) измерения производили в момент выхода кристалла из зоны обработки.

Результаты экспериментальных исследований (рис. 8) показывают, что наибольшему нагреву в процессе квазипластичной обработки подвергается средняя часть ПС образца. Полученное распределение температуры цилиндрического образца лейкосапфира по радиусу (рис. 9) соответствовало теоретическому распределению [5].

Знание распределения температуры образца по радиусу позволяет оценить изменение формы поверхности образца вследствие неравномерного теплового расширения. На основании экспериментов были получены зависимости температуры образца лейкосапфира от времени обработки при различных величинах врезной подачи [6].

В проведенных исследованиях получены экспериментальные зависимости температуры отдельных участков образца при обработке от изменения врезной подачи и скорости прохода стола станочного модуля.

Экспериментально определенные зависимости температуры ОП минерала от скорости продольного прохода стола станочного модуля, определяющей время контакта ОП с инструментом, показали незначительное влияние этого параметра на температурное поле образца. Анализ экспериментальных тер-

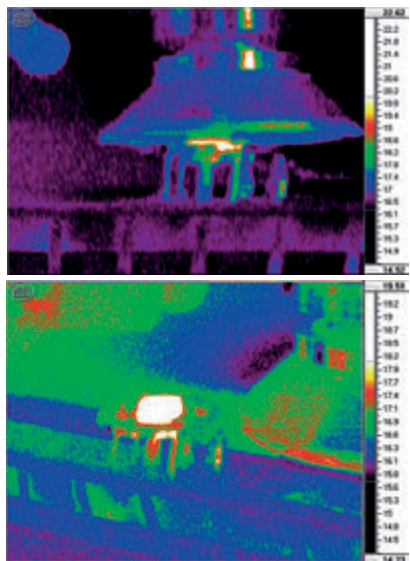


Рис. 8. Кадры экспериментальной тепловизионной съемки процесса обработки

мограмм процесса квазипластичной обработки образца лейкосапфира при разных врезных подачах показал, что ПС разогревается значительно сильнее остальной массы образца. При режиме квазипластичной обработки основной поток тепла распространяется в ПС обрабатываемого минерала и уносится при удалении мельчайших частиц ПС. Проведенные экспериментальные исследования на образцах алмаза и лейкосапфира показали, что одним из условий обработки поверхности в режиме квазипластичности без перехода в состояние хрупкого разрушения являются соотношения длительности периодов обработки и пассивного воздушного охлаждения (от 0,3 до 10 с – для лейкосапфира, от 0,5 до 5 с – для алмаза). Традиционное применение СОЖ при квазипластичном удалении поверхностного слоя не дало положительных результатов. Воздействие физических полей (акустического, электромагнитного) при обработке в режиме квазипластичности повышает производительность процесса обработки, поскольку увеличивает подвижность дислокаций.

Кроме того, проведенные исследования позволяют высказать предположение о рассмотрении квазипластичности твердых хрупких минералов как отдельного фазового состояния, возникающего в момент обработки при определенных условиях.

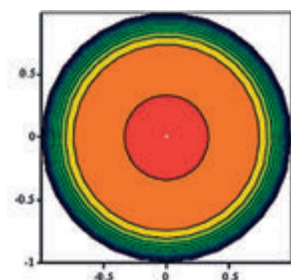


Рис. 9. Теоретическая зависимость безразмерной температуры поверхности от безразмерного радиуса обработки

Знание средней температуры образца в совокупности с известной зависимостью коэффициента линейного теплового расширения и толщиной образца позволяют определить изменение его размеров в процессе обработки и соответствующим образом скорректировать величину врезной подачи обрабатываемого инструмента.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Гончаров С.А. Термодинамика. М.: МГУ, 1997. 440 с.
2. Панин В.Е. Современные проблемы пластичности и прочности твердых тел // Известия вузов. Физика. 1998. Т. 41. № 1. С. 7–34.
3. Панин В.Е. Поверхностные слои нагруженных твердых тел как мезоскопический структурный уровень деформации // Физ. мезомеханика. 2001. Т. 4. № 3. С. 5–22.
4. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород / 4-е изд. М.: Недра, 1984. 359 с.
5. Теплова Т.Б., Коньшин А.С., Соловьев В.В. Особенности микрошлифования кристаллов лейкосапфира на станочном модуле с ЧПУ // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. № 3. С. 52–56.
6. Теплова Т.Б., Коньшин А.С., Соловьев В.В., Ашкинази Е.Е. О выборе рациональных режимов процесса микрошлифования монокристалла лейкосапфира // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2005. № 9. С. 76–83.
7. Теплова Т.Б., Коньшин А.С., Гридин О.М., Плотников С.А. Влияние теплового расширения на качество плоских поверхностей монокристалла лейкосапфира // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2006. № 11. С. 345–350.
8. Теплова Т.Б. Критерии квазипластичного режима при направленном поверхностном разрушении твердых материалов // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. № 4. С. 241–243.
9. Теплова Т.Б. Анализ энергетических и силовых параметров усталостного разрушения поверхностного слоя твердых минералов при механическом воздействии // Горный информационно-аналитический бюллетень. 2007. № 7. С. 91–98.
10. Теплова Т.Б. Тепловые процессы при механической обработке твердых минералов // Горный журнал. 2007. № 12. С. 42–45.
11. Теплова Т.Б. Разработка научных основ создания технологии прецизионной обработки твердых хрупких минералов. Дис. на соиск. учен. ст. д-ра техн. наук. М.: ЭНИМС, 2009.

ТЕПЛОВА Татьяна Борисовна –

доктор технических наук, профессор, преподаватель
Центра алмазных технологий и геммологии ГАПОУ
КП № 11

weldex 201
россварка

20-Я МЕЖДУНАРОДНАЯ
ВЫСТАВКА СВАРОЧНЫХ
МАТЕРИАЛОВ, ОБОРУДОВАНИЯ
И ТЕХНОЛОГИЙ

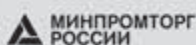
12-15 | РОССИЯ
ОКТАБРЯ 2021 | МОСКВА
КРОКУС ЭКСПО

ЗАБРОНИРУЙТЕ СТЕНД
WELDEX.RU



+7 (495) 799-55-85
weldex@hyve.group

Официальная
поддержка:



Генеральный
информационный
партнер:



Журнал
«Сварочное производство»

