© Т.Б. Теплова, 2007

УДК 621.7

Т.Б. Теплова

АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И СИЛОВЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА УСТАЛОСТНОГО РАЗРУШЕНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ ТВЕРДЫХ МИНЕРАЛОВ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Одной из основных проблем поверхностной обработки твердых минералов для высокотехнологичных изделий в области нанотехнологий является обеспечение разрушения поверхностного слоя без привнесения дефектов, обусловленных процессом хрупкого разрушения. Это особенно актуально для получения поверхности нанометрового рельефа, шероховатость которого (1,0-0,3нм) соизмерима с параметрами кристаллической решетки обрабатываемого минерала.

Особенности процессов деформирования тонкого поверхностного слоя исследовано специалистами в области физической мезомеханики [1].

Физическая мезомеханика рассматривает поверхностный слой в нагруженных материалах как самостоятельный мезоскопический структурный уровень деформации, который имеет более высокую концентрацию дефектов и пониженный, по сравнению с основным объемом материала, предел сдвиговой устойчивости.

Аналогичные процессы наблюдались в поверхностном слое твердых минералов при снижении интенсивности механического воздействия [2]. По-видимому, подповерхностный слой кристалла можно рассматривать как подложку поверхностного слоя, который в свою очередь имеет более высокую концентрацию дефектов. В процессе механического воздействия, когда поток поверхностных дефектов распространяется от первичного концентратора напряжений вглубь кристалла, подложка деформируется упруго и тормозит развитие потока поверхностных дефектов. В результате наибольшее развитие и распространение дефектов при воздействии на поверхностный слой кристалла ритмичного знакопеременного механического поля происходит в поверхностном слое кристалла в направлении максимальных касательных напряжений.

Режим квазипластичности хрупких минералов можно обеспечить при специальном подборе таких параметров, как усилие прижима и скорости движения инструмента параллельно поверхности кристалла, подвергаемой механическому воздействию. При определенных соотношениях величин нормальных и касательных напряжений возникает напряженно-деформи-руемое состояние в поверхностном слое, которое не соответствует энергии критических напряжений, характеризующих хрупкое разрушение. При определении величины напряжений в поверхностном слое следует учитывать шероховатость рельефа, т.к. в результате воздействия инструмента в поверхностном слое возникают циклические напряжения, которые мо-

Таблица 1

Классификация энергетических уровней состояния поверхностного при механическом воздействии

Состояние поверхностного слоя твердого минерала при механическом воздействии	**Диапазон удельной величины энергии упругой деформации W Дж · м $^{-3}$**
При механической обработке хрупкое разрушение	$W > \dfrac{\sigma_p^{\ 2}}{2 \cdot E}$
Режим квазипластичности	$\dfrac{\tau_n^{\ 2}}{2 \cdot E} < W < \dfrac{\sigma_p^{\ 2}}{2 \cdot E}$
Упругое деформирование материала	$W < \dfrac{\tau_n^{\ 2}}{2 \cdot E}$

где E – модуль упругости, Па; τ_n – предел Пайерлса, Па; σ_p – предел прочности на растяжение, Па.

гут вызвать разрушения усталостного характера.

При малых усилиях воздействия величина напряжений может быть недостаточна для проявления обусловленных движением дислокаций пластичных свойств хрупких кристаллов, если эти напряжения меньше пределов Пайерлса ($\tau_п$). Поэтому режим квазипластичности должен лежать в диапазоне энергий, превышающих упругую энергию, соответствующую пределу Пайерлса с одной стороны, и быть меньше величины упругой энергии, соответствующей напряжениям хрупкого разрушения. С учетом вышеизложенного, можно сформировать классификацию энергетического воздействия, позволяющую распределять эффекты, возникающие в поверхностном слое твердого минерала при механическом воздействии. Классификация энергетических уровней воздействий инструмента на хрупкие минералы при их поверхностной обработке приведена в табл. 1.

Оценим диапазон энергий для режима квазипластичности на примере лейкосапфира.

σ_p =800 МПа; E = 46 · 10^{10} Па

Величину предела Пайерлса можно определить из соотношения [3]:

$\tau_n = 3{,}6 \cdot 10^{-6} \cdot E =$

$=3{,}6 \cdot 10^{-6} \cdot 46 \cdot 10^{10} = 1{,}65$ МПа

Максимально допустимая энергия упругой деформации, обеспечивающая отсутствие хрупкого разрушения составит:

$$W_{\max} = \frac{\sigma_p}{2 \cdot E} = \frac{800 \cdot 10^6}{10^{10}} =$$

$=605 \cdot 10^3 = 605$ кДж·м $^{-3}$

Минимальная энергия упругой деформации, характеризующая начало пластических процессов, обусловленных движением дислокаций, составит:

$$W_{\min} = \frac{\tau_n^{\ 2}}{} = \frac{\left(1{,}65 \cdot 10^6\right)^2}{} =$$

= 0,0

Ср
макси
казыв
возде
пласт
минер

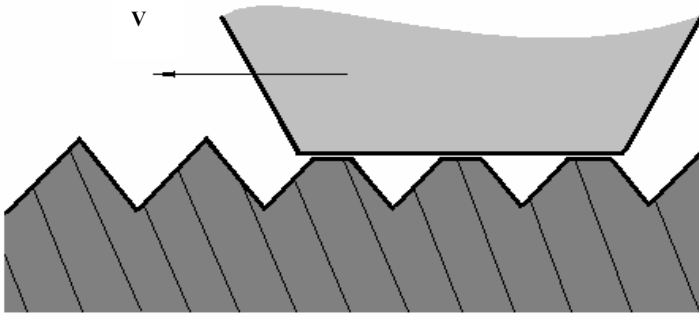

Рис. 1, а. Модель взаимодействия инструмента с поверхностью твердого минерала

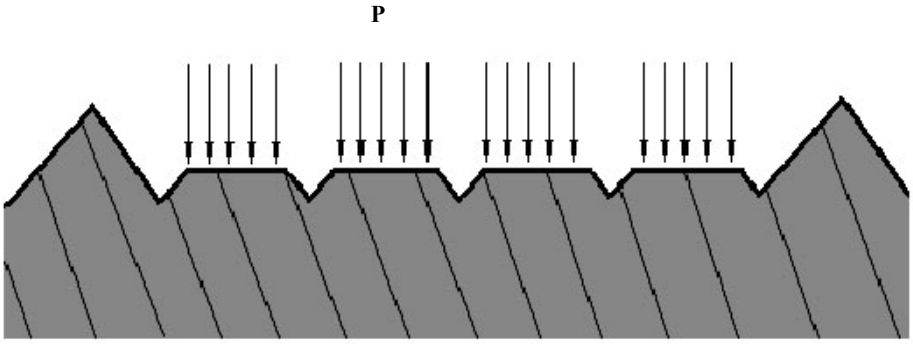

Рис. 1, б. Распределенная нагрузка действующая на каждую микронеровность

меньше, чем энергетическое воздействие хрупкого разрушения.

Широкий интервал энергетического диапазона квазипластического состояния поверхностного слоя твердых минералов затрудняет задачу выбора оптимального режима механического воздействия.

Для решения данной задачи рассмотрим процесс механического взаимодействия инструмента с поверхностью твердого минерала.

На рис. 1 представлена модель взаимодействия инструмента с поверхностью твердого минерала при формообразовании нанометрового рельефа поверхности.

В дальнейшем, при анализе механизма взаимодействия приняты следующие допущения:

Инструмент является абсолютно жестким телом с гладкой горизонтальной поверхностью. Данное допущение может быть принято на основании того, что инструментом является алмазное зерно, размер которого на порядок и более превышает размер шероховатости и имеет плоскую воздействующую поверхность, образовавшуюся в результате её износа.

Процесс рассматривается как квазистатический. Данное допущение может быть принято на основе оценки времени воздействия инструмента и величины характерных времен волновых процес-

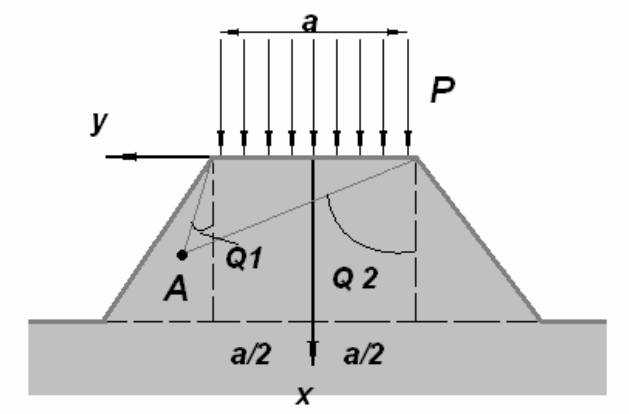

Рис. 2. Напряженное состояние в точке поверхностного слоя под действием распределенной нагрузки

сов, отличающихся более чем на 3 порядка.

Задача решается в плоском приближении.

В результате воздействия инструмента на микронеровности поверхности происходит их упругое деформирование (рис. 1, *а*). Воздействие инструмента можно заменить распределенной нагрузкой, действующей на каждую микронеровность (рис. 1, *б*). Принимаем допущения, что нагрузка в области контакта является равномерной.

На основании вышеизложенного решение задачи можно свести к известной плоской задаче [4] по определению напряженного состояния в любой точке А полупространства под действием распределенной нагрузки (рис. 2).

Известное решение [4] в напряжениях может быть записано в виде:

$$\sigma_x = -\frac{2P}{\pi} \cdot (2(\theta_2 - \theta_1) + \sin 2(\theta_2 - \theta_1)) \quad (1)$$

$$\sigma_y = -\frac{2P}{\pi} \cdot (2(\theta_2 - \theta_1) - \sin 2(\theta_2 - \theta_1)) \quad (2)$$

$$\tau_{xy} = -\frac{2P_1}{\pi} \cdot \cos 2(\theta_2 - \theta_1) \quad (3)$$

где $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ – нормальные и касательные напряжения в точке А, определяемой полярными координатными углами θ_1 и θ_2; P_1 – величина контактных напряжений

Проведем преобразование напряжений к главной площадке и перейдем к главным напряжениям:

$$\sigma_1 = 0 \quad (4)$$

$$\sigma_2 = ½ \{(\sigma_x + \sigma_y) + \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}\} \quad (5)$$

$$\sigma_3 = ½ \{(\sigma_x + \sigma_y) - \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2}\} \quad (6)$$

где σ_1, σ_2, σ_3 –главные напряжения.

С учетом (1), (2), (3) можно получить выражения для главных напряжений через нормальные и касательные напряжения в точке А.

Рассматривая критерий Мора, наиболее часто применяющийся в практике горного дела для оценки условий хрупкого разрушения, а также аналитическую зависимость критерия Мора, совпадающую с критерием Кулона - Навье, условие хрупкого разрушения может быть представлено в виде [5]:

$$\frac{\sigma_1 - \sigma_{сж}}{\sigma_p \cdot \sigma_3} = \sigma_{сж} \quad (7)$$

учитывая, что $\sigma_1 = 0$, критерий хрупкого разрушения примет вид:

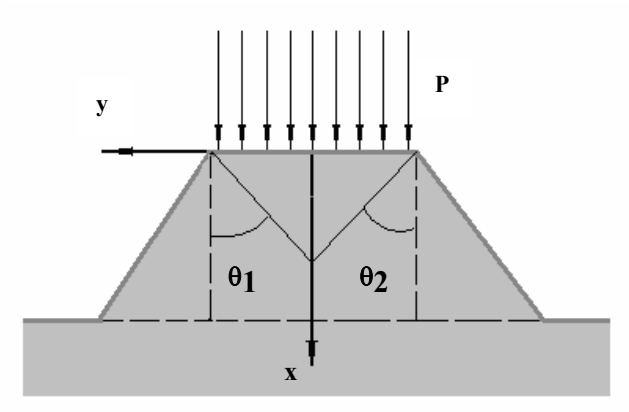

Рис. 3. Схема определения напряжений на оси микронеровности

$$\sigma_3 = \sigma_p \qquad (8)$$

и с учетом выражения (9) приме вид

$$\sigma_p = -\frac{1}{2} \cdot \frac{2P}{\pi} \cdot 2\ \{2(\theta_2 - \theta_1) - 1\} \qquad (9)$$

Условие отсутствия хрупкого разрушения для любой точки поверхностного слоя примет вид:

$$\sigma_3 = -\frac{2P}{\pi} \cdot \{2(\theta_2 - \theta_1) - 1\} < \sigma_p \qquad (10)$$

Наиболее опасная точка возникновения трещины в поверхностном слое находится в начале координат, что соответствует значению:

$$\theta_2 = \frac{\pi}{2}, \text{ а } \quad \theta_1 = -\frac{\pi}{2},$$

откуда получаем выражение, для определения критических контактных напряжений:

$$\frac{2P}{\pi} \cdot \{2\pi - 1\} \le \sigma_p \qquad (11)$$

или

$$P < P_{kp} \text{ где } \ P_{kp} = \sigma_p \cdot \frac{\pi}{2} \cdot \frac{1}{(2\pi - 1)} \qquad (12)$$

- величина критических контактных напряжений, способствующих прохождению хрупкого разрушения.

Зная величину критических контактных напряжений, определяющих верхнюю границу квазипластичного состояния поверхностного слоя, можно определить условия квазипластичнкого разрушения поверхностного слоя по аналогии с принципами в мезомеханике, а также руководствуясь известным подходом усталостного разрушения [6].

Воспользуемся кривой Веллера (рис. 3) из которой может следовать критерий квазипластичного усталостного разрушения поверхностного слоя при многократном нагружении каждой микронеровности рельефа поверхности.

$$\sigma_{экв} \cdot N = \sigma_p, \qquad (13)$$

где N – количество циклов нагружений; $\sigma_{экв}$ = величина эквивалентного нагружения в заданной точке поверхностного слоя, определяемого, исходя из величины главных напряжений в каждой точке по критерию Мизеса составит:

$$\sigma_{экв} = \sqrt{(\sigma_2{}^2 + \sigma_3{}^2) - \sigma_2 \cdot \sigma_3} \qquad (14)$$

Критерий Мизеса выбран на основе предположения, что энергия формоизменения эквивалентна энергии пластического деформирования материала.

Данный подход допустим при сравнительной оценке степени разупрочнения хрупких тел. При таком подходе имеется в виду, что на про-цесс разупрочнения твердого тела, т.е. частичной потери его прочности под действием предварительной механической нагрузки,

основное влияние оказывают касательные напряжения [5].

Наложение пластической деформации с ростом количества циклов нагружений в соответствии с равенством (13) приведет к критическому разупрочнению соответствующего объема поверхностного слоя при любом случайном воздействии на объем поверхностного слоя, накопившего достаточное количество пластической деформации происходит разрушение.

На основании выражения (14) и (5), (6) получаем:

$$\sigma_{экв} = \frac{2P}{\pi} \cdot \sqrt{4(\theta_2 - \theta_1)^2 + 3} \qquad (15)$$

Для обеспечения отсутствия хрупкого разрушения величина контактных напряжений должна быть меньше критических, определяемых выражением (12).

Предположим, что величина контактных напряжений равна

$$P = \alpha \cdot P_{kp} \qquad (16)$$

где α – коэффициент запаса хрупкого разрушения α <1.

С учетом выражения (12) выражение (16) примет вид:

$$P = \alpha \cdot \sigma_p \cdot \frac{\pi}{2} \cdot (2\pi - 1) \qquad (17)$$

Подставляя выражение (17) в (15) получим величину эквивалентных напряжений в любой точке подповерхностного слоя, определяемого координатами θ_1 и θ_2.

Получаем

$$\sigma_{экв} = \frac{2}{\pi}\alpha\sigma_p - \frac{\pi}{2}(2\pi - 1)\sqrt{4(\theta_2 - \theta_1)^2 + 3} = \\ = \alpha \cdot \sigma_p \cdot (2\pi - 1) \cdot \sqrt{4(\theta_2 - \theta_1)^2 + 3} \qquad (18)$$

Максимальная величина эквивалентных напряжений, характеризующих квазипластичность имеет место в начале координат (рис. 1, *а*).

При этом $\theta_2 - \theta_1 = \pi$

На основании этого определяем величину максимальных эквивалентных напряжений в точке начала координат.

Подставляя в выражение (18) максимальные значения, получаем

$$\sigma_{экв.\,max} = \alpha \cdot \sigma_{p.} \cdot \sqrt{4\pi^2 + 3} = \\ = \alpha \cdot \sigma_p \cdot \frac{6{,}5}{5{,}28} = 1{,}23 \cdot \alpha \cdot \sigma_p \qquad (19)$$

Анализ выражения (19) показывает, что даже при значениях $\alpha = \frac{1}{1{,}23} = 0{,}81$, что соответствует отсутствию хрупкого разрушения, величина $\sigma_{экв.\max} = \sigma_p$, что подтверждает наличие характера квазипластического разрушения при отсутствии хрупкого разрушения (отсутствие трещин в поверхностном слое).

На практике работа в области контактных напряжений близких к величине P_{kp} является затруднительной из-за невозможности создания одинаковой величины контактных напряжений по поверхности кристалла, т.к микронеровности неоднородны по высоте. Поэтому величина средних контактных напряжений на практике удовлетворяет выражению:

$$\alpha << 1 \qquad (20)$$

На практике средняя величина контактных напряжений составляет 1 МПа, σ_p для сапфира 800 МПа, следовательно коэффициент α составляет

$$\alpha = \frac{1}{800} = 1{,}2 \cdot 10^{-3}$$

Исходя из вышеизложенного можно определить необходимое количество

циклов нагружения, исходя из выражения (13) и (18).

$$N = \frac{\sigma_p}{\sigma_{экв}} = \frac{\alpha \cdot \sqrt{4(\theta_2 - \theta_1)^2} + 3}{2\pi - 1}, \qquad (21)$$

где θ_1 и θ_2 будут определять объем снимаемого материала (рис. 3).

Определим взаимосвязь количество циклов нагружений от глубины проникновения инструмента и накопления пластических деформаций, достаточных для квазипластического разрушения.

$$\theta_2 = \frac{arctg\alpha}{2h}, \quad \theta_1 = -\frac{arctg\alpha}{2h},$$

$$\theta_2 - \theta_1 = \frac{2arctg\alpha}{2h}, \qquad (22)$$

где α – размер пятна контакта.

Количество циклов нагружения N определяется скоростью движения зерна абразива V, его размером $d_{зер}$ и расстоянием между зернами A и будет определяться согласно выражению:

$$N = \frac{V}{A} \cdot t_{обр} \qquad (23)$$

где $t_{обр}$ - время обработки.

Величина А является характеристикой инструмента и может быть определена выражением:

$$A = \frac{d_{зер}}{K_{зап}} \qquad (24)$$

где $d_{зер}$ - средний размер зерен абразива, мкм; $K_{зап}$ –коэффициент заполнения абразивом шлифовального круга.

Величина линейной скорости определяется его угловой скоростью и радиусом:

$$V = w \cdot R \qquad (25)$$

где R – радиус шлифовального круга, м; w – угловая скорость вращения.

На основании выражений (23), (24), (25) количество циклов нагружения N определяется выражением:

$$N = \frac{w \cdot R \cdot K_{зап} \cdot t_{обр}}{d_{зер}} \qquad (26)$$

На основании выражений (26) и (25) выражение (24) принимает вид:

$$\frac{w \cdot R \cdot K_{зер} \cdot t_{обр}}{d_{зер}} = \frac{2\pi - 1}{\alpha \cdot \sqrt{16arctg^2 \frac{a}{2h} + 3}}$$

Откуда можно выразить необходимое время обработки в зависимости от скоростного режима обработки:

$$t_{обр} = \frac{d_{зер} \cdot (2\pi - 1)}{w \cdot R \cdot K_{зап} \cdot \alpha \cdot \sqrt{16arctg^2 \frac{a}{2h} + 3}},$$

$$t_{обр} = \frac{(2\pi - 1)}{\sqrt{3}} \cdot \frac{d_{зер}}{w \cdot R \cdot K_{зап} \cdot \alpha} \qquad (27)$$

Выражение (27) дает возможность оценить время обработки, характеризующее единовременное пластичное разрушение микрообъема отдельной микронеровности в зависимости от размера зерна абразива, линейной, линейной скорости инструмента, коэффициента заполнения шлифовального круга абразивом, величиной удельного усилия α, как доли контактных напряжений от величины от величины σ_p. Оценка величины $t_{обр}$ показывает, что время необходимое для снятия 1 микрообъема составляет доли секунды. При этом величина шероховатости изменяется, а для снятия следующего микрообъема требуется такое же время $t_{обр}$. Суммарное

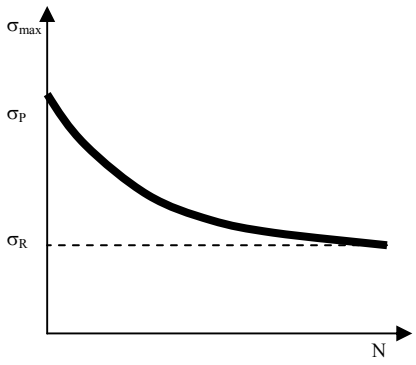

Рис. 4. Кривая Веллера (усталостного разрушения)

время обработки может быть определено как произведение величины $t_{обр}$ на величину равную количеству микрообъемов, необходимых для получения нужной шероховатости. Определение количества микрообъемов, подлежащих удалению является величиной неопределенной, т.к. высота микронеровностей рельефа поверхностей является величиной случайной, подчиняющийся *некоторому* закону распределения шероховатости [7], что приводит к неоднородному распределению величины контактных напряжений и к концентрации в областях поверхности, имеющую max шероховатость. Поэтому при отработке реального технологического процесса необходим контроль статических и динамических составляющих усилия прижима, а также частотных характеристик биения [8]. Можно утверждать, что рациональный режим изменения усилия прижимав процессе обработки должен носить характер возрастания во времени на стадии выравнивания неоднородности шероховатости с последующем снижением в процессе обработки на стадии уменьшении величины шероховатости для обеспечения снижения величины удаляемых микрообъемов, поскольку величина удаляемого микрообъема, согласно выражению (22), зависит от величины контактных напряжений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Панин В.Е.* // В кн.: Физика хрупкого разрушения. Ч. 1. - Киев: Изд-во ИМП АН УССР, 1976. - С. 3-16.

2. *Bifano. T.G. .Blake. P., Dow, T.A., and Scattergood, R.O.,* “Precision Machining of Ceramic Materlals” Proc. of the Intersociety Symposium on the Machining of Ceramic Materials and Components.R. E. Parks.K. Subramsnian K Ball eds Am Cer. Soc., ASME Abras. End. Soc..pp.99-120, April. 1987 (Updated and Reprinted in American Ceramic Society Bulletin, June.1988. Vol.

Коротко об авторах

Теплова Т.Б. – кандидат технических наук, докторант кафедры «Физика горных пород и процессов», Московский государственный горный университет.