

УДК 621. 879.

Л.Б. Буртолик, П. И.Дубинин, В. В. Девятьярова, С. П. Дубинин, МГГУ

## 2. Энергоемкость объемного и поверхностного разрушения декоративного природного камня единичным алмазным зерном при алмазном зерном при алмазном сверлении и шлифовании.

Работа  $A_i$ , совершенная ядром уплотнения за один цикл в режиме объемного разрушения камня (рис. 1), определяется выражением [1,2]:

$$A_i = \frac{2P_i V_{oi} \mu F_{pi}}{S_{ki} E} - \frac{P_i^2 V_{oi}^2}{2K} \quad (1),$$

где  $P_i$  – нагрузка на ядро уплотнения, Па;  $V_{oi}$  – объем ядра уплотнения, м<sup>3</sup>;  $\mu$  – коэффициент Пуассона камня;  $F_{pi}$  – сила разрушения камня единичным алмазным зерном;  $S_{ki}$  – площадь контакта алмазного зерна с поверхностью камня, м<sup>2</sup>;  $E$  – модуль Юнга природного камня, Па;  $\sigma_p$  – предел прочности природного камня на растяжение, Па;  $K$  – объемный модуль упругости;  $K = E/3(1-2\mu)$ , Па.

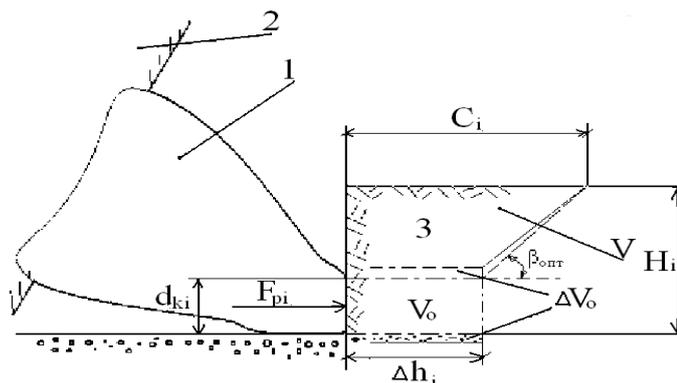


Рис. 1. - Разрушение природного камня единичным алмазным зерном в режиме «скола»: 1 – алмазное зерно, 2 – связка шлифовального круга, 3 – объем камня, разрушаемого в режиме «скола».

Нагрузка на ядро уплотнения вычисляется:

$$P_i = \sigma_p \frac{S_{pi}}{S_{voi}} \quad (2),$$

где  $S_{pi}$  – площадь поверхности разрушения камня единичным алмазным зерном за один цикл, м<sup>2</sup>;  $S_{voi}$  – поверхность ядра уплотнения, на которую действует нагрузка  $P_i$ , м<sup>2</sup>.

Выразим  $S_{pi}$  через разрушаемый объем и расстояние до свободной поверхности  $H_i$  (толщину разрушаемого слоя) в виде:

$$S_{pi} = \frac{k_\phi V_i}{H_i} \quad (3),$$

где  $k_\phi$  – коэффициент формы отбиваемого объема камня  $V_i$ , с учетом отклонения от формы параллелепипеда.

Площадь поверхности ядра уплотнения, на которую действует нагрузка  $P_i$ , с учетом коэффициента контакта единичного алмазного зерна с камнем, определяется из выражения:

$$S_{voi} = \frac{1}{2} k_\kappa \pi d_3 h_i \quad (4),$$

где  $k_\kappa$  – коэффициент контакта алмазного зерна с камнем,  $d_3$  – диаметр единичного алмазного зерна;  $h_i$  – глубина распространения в массиве камня ядра уплотнения, формируемого единичным алмазным зерном, на которой затухает энергия силового воздействия, приводящего к разрушению камня:

$$h_i = \frac{F_{pi}}{\sigma_o k_\kappa d_3} \quad (5),$$

где  $\sigma_o$  – объемная прочность камня,  $\sigma_o \cong K = E/3(1-2\mu)$  [1].

При этом объем ядра уплотнения равен:

$$V_o = \frac{1}{4} k_\kappa^2 \pi d_3^2 h_i \quad (6).$$

Площадь контакта единичного алмазного зерна с поверхностью камня вычисляется:

$$S_{ki} = \frac{1}{4} k_\kappa^2 \pi d_3^2 \quad (7).$$

Применив в (2)  $S_{pi}$  (3),  $S_{voi}$  (4) и  $h_i$  (5) получаем:

$$P_i = \frac{2k_\phi \mu \sigma_p V_i \sigma_o}{\pi H_i F_{pi}} \quad (8).$$

После введения значений  $S_{ki}$  (7),  $V_{oi}$  (6) и  $P_i$  (8) в формулу (1) получим работу производимую ядром уплотнения за один цикл:

$$A_i = \frac{4k_\phi \mu \sigma_p V_i F_{pi}}{\pi d_3 k_\kappa E H_i} - \frac{6k_\phi^2 \sigma_p^2 V_i^2 (1-2\mu)}{\pi^2 k_\kappa d_3 E H_i^2} \quad (9).$$

Работа по разрушению объема камня -  $V_i$  должна быть равна работе производимой ядром уплотнения, поэтому, применяя  $A_i$  (9), составим уравнение закона сохранения энергии для одного цикла разрушения камня.

$$\frac{4k_\phi \mu \sigma_p V_i F_{pi}}{\pi d_3 k_\kappa H_i E} - \frac{6k_\phi^2 \sigma_p^2 V_i^2 (1-2\mu)}{\pi^2 k_\kappa d_3 E H_i^2} = \frac{\sigma_p^2 k_{nl} V_i}{E} \quad (10).$$

Из уравнения (10) видно, что при постоянной силе  $F_{pi}$  разрушение природного камня происходит периодически: в ядро уплотнения с помощью единичного алмазного

зерна вводится энергия, достаточная для разрушения определенного объема материала  $V_i$ . При значении  $A_i < \sigma_p^2 k_{пл} V_i/E$  разрушение камня не происходит.

Работа  $A_i$ , совершаемая ядром уплотнения, зависит от усилия на алмазном зерне ( $F_{pi}$ ), физико-технических свойств природного камня ( $\sigma_p$ ,  $\mu$ ,  $E$ ,  $k_{пл}$ ), размера и формы алмазного зерна ( $k_\kappa d_3$ ), технологического параметра  $H_i$  (толщины слоя, разрушаемого единичным алмазным зерном).

Из уравнения (10) определим объем камня, разрушаемый сколом за цикл:

$$V_i = \frac{2\pi\mu F_{pi} H_i}{3k_\phi \sigma_p (1-2\mu)} - \frac{\pi^2 k_{нл} k_\kappa d_3 H_i^2}{6k_\phi^2 (1-2\mu)} \quad (11).$$

Из уравнения (11) определим значение минимальной силы воздействия алмазного зерна на камень, при котором разрушения камня не происходит, т.е.  $V_i = 0$ .

$$F_{pi \min} = \frac{\pi k_\kappa d_3 k_{нл} H_i \sigma_p}{4k_\phi \mu} \quad (12).$$

Разрушаемый за один цикл объем камня  $V_i$  в уравнении (11) является явной функцией  $H_i$ , поэтому, решая уравнение  $\frac{\partial V}{\partial H} = 0$ , получим:

$$\frac{8\mu F_{pi}^2}{3k_\phi d_3^2 \sigma_p (1-2\mu) \sigma_o} - \frac{4\pi k_\kappa k_{нл} F_{pi} H_i}{3k_\phi^2 d_3 (1-2\mu)} = 0 \quad (13).$$

Из уравнения (13) определим оптимальную толщину разрушаемого слоя, снимаемого единичным алмазным зерном в режиме скола в зависимости от величины силового воздействия.

$$H_{opt} = \frac{2\mu k_\phi F_{pi}}{\pi d_3 k_\kappa k_{нл} \sigma_p} \quad (14).$$

При разрушении природного камня стружками оптимальной толщины  $H_{opt}$  достигается максимальная производительность обработки при минимальной энергоемкости. При этом объем разрушения вычисляется из выражения:

$$V_{i \max} = \frac{2\mu^2 F_{pi}^2}{3k_\kappa d_3 k_{нл} \sigma_p^2 (1-2\mu)} \quad (15).$$

Подставив  $F_{pi}$  (14) в уравнение (15) получим:

$$V_{i \max} = \frac{\pi^2 k_\kappa d_3 k_{нл} H_i^2}{6k_\phi^2 (1-2\mu)} \quad (16).$$

Энергоемкость единичного цикла разрушения определяется из выражения:

$$q_i = \frac{Q_i}{V_i} \quad (17).$$

За один цикл разрушения в ядро уплотнения вводится энергия  $Q_i$  равная:

$$Q_i = F_{pi} \Delta h_i \quad (18),$$

причем  $\Delta h_i = h_i \varepsilon$ , где  $h_i = \frac{F_{pi}}{k_\kappa d_3 \sigma_o}$ , поэтому  $\Delta h_i = \frac{F_{pi}}{k_\kappa d_{\kappa i} \sigma_o} \varepsilon$  (19),

но  $\varepsilon = \frac{\sigma_o}{E}$  и тогда  $\Delta h_i = \frac{F_{pi}}{k_\kappa d_3 E}$  и, следовательно:

$$Q_i = \frac{F_{pi}^2}{k d E} \quad (20).$$

Минимальная энергоемкость разрушения может быть получена только при максимальном объеме разрушения камня единичным алмазным зерном  $V_{i\max}$  (15), поэтому:

$$q_{i\min} = \frac{6k_\phi^2(1-2\mu)F_{pi}^2}{\pi^2 k_\kappa^2 d_3^2 k_{nl} E H_i^2}. \quad (21).$$

Из выражения (21) следует: для обеспечения процесса алмазно-абразивной обработки природного камня с минимальной энергоемкостью, при оптимальном силовом воздействии, необходимо применять инструмент с максимально возможной зернистостью.

Механизм разрушения природного камня выколом на одну свободную поверхность происходит под действием силы  $F_{pi}$ , приложенной к алмазному зерну, при этом формируется первичное ядро уплотнения  $V_{o1i}$ , которое расширяется перпендикулярно силе  $F_{pi}$ , параллельно свободной поверхности, в результате чего происходит формирование вторичного ядра уплотнения  $V_{o2i}$  [1,2]. Вторичное ядро уплотнения расширяется перпендикулярно свободной поверхности, и выкалывается некоторый объем массива камня  $V_{io}$  на одну свободную поверхность (рис. 2).

Для образования объемного разрушения (режим скола) необходимо соблюдать условие:

$$A_{\max} = Q \eta_{\max} \quad (22),$$

где  $Q$  – энергия, трансформируемая в камень, посредством единичного алмазного зерна,  $\eta_{\max} = \frac{2\mu^2}{3(1-2\mu)}$  - максимальный КПД преобразования энергии ядром уплотнения [3, 4].

При поверхностном разрушении работа равна:

$$A_{\max} = Q \eta_{\max}^2. \quad (23)$$

С учетом значений (1), (9), (22), составим уравнение закона сохранения энергии для разрушения камня на одну свободную поверхность:

$$\frac{4k_{\phi}\mu\sigma_p V_i F_{pi} \eta_{\max}}{\pi d_3 k_{\kappa} H_i E} - \frac{6k_{\phi}^2 \sigma_p^2 V_i^2 (1-2\mu)}{\pi^2 k_{\kappa} d_3 E H_i^2} = \frac{\sigma_p^2 k_{nl} V_i}{E}, \quad (24)$$

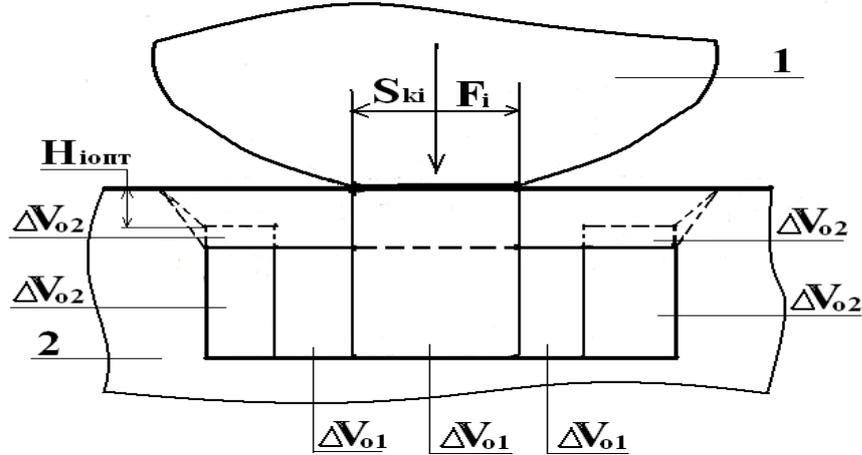


Рис. 2 - Схема разрушения природного камня выколом (поверхностное разрушение): 1-алмазное зерно, 2-природный камень,  $V_{o1}$ - объем первичного ядра уплотнения,  $\Delta V_{o1}$  –расширение первичного ядра уплотнения,  $V_{o2}$  – объем вторичного ядра уплотнения,  $\Delta V_{o2}$  – расширение вторичного ядра уплотнения.

Из уравнения (24) определим объем камня, разрушаемого единичным алмазным зерном за один цикл разрушения выколом:

$$V_{is} = \frac{2\pi\mu F_{pi} H_i \eta_{\max}}{3k_{\phi} \sigma_p (1-2\mu)} - \frac{\pi^2 k_{nl} k_{\kappa} d_3 H_i^2}{6k_{\phi}^2 (1-2\mu)} \quad (25).$$

Оптимальная глубина лунки выкола достигается самопроизвольно и определяется из условия  $\frac{\partial V}{\partial H} = 0$ :

$$H_{isopt} = \frac{2\mu k_{\phi} F_{pi} \eta_{\max}}{\pi k_{\kappa} d_3 k_{nl} \sigma_p} \quad (26).$$

При внедрении алмазного зерна в камень с силой  $F_{pi}$ , ядро уплотнения распространяется на глубину лунки выкола  $H_{iont}$ , при которой разрушаемый объем достигает максимальной величины:

$$V_{is\max} = \frac{2\mu^2 F_{pi}^2 \eta_{\max}^2}{3k_{\kappa} d_3 k_{nl} \sigma_p^2 (1-2\mu)} \quad (27).$$

При этом энергоемкость поверхностного разрушения для  $V_{is\max}$  равна:

$$q_{is\min} = \frac{6k_{\phi}^2 (1-2\mu) F_{pi}^2}{\pi^2 k_{\kappa}^2 d_3^2 k_{nl} E H_i^2 \eta_{\max}} \quad (28).$$

Сравнивая объемное и поверхностное разрушения, отметим, что производительность при разрушении декоративного природного камня в режиме скола в  $\eta_{\max}^{-1}$  раз больше, чем в режиме разрушения выколом, т.е. примерно на один порядок, а энергоемкость

разрушения сколом в  $\eta^{-1}_{\max}$  раз меньше, чем при разрушении выколом. Отсюда следует вывод: обработку декоративного природного камня при алмазном сверлении и шлифовании целесообразно осуществлять в режиме скола.

#### **Список литературы:**

1. **Протасов Ю.И.** Разрушение горных пород. – М.: МГГУ, 2002, С.453.
2. **Дубинин П.И.** Повышение производительности круглого шлифования изделий из природного камня на основе обоснования энергосберегающих режимов хрупкого разрушения. Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук. – М.: 2010, С.144.
3. **Дубинин П.И.** Особенности механизма разрушения природного камня единичным алмазным зерном при глубинном врезном шлифовании. - Добыча, обработка и применение природного камня: сб. науч. тр. – Магнитогорск: МГТУ, 2005, С. 214-226.
4. **Вержанский А.П., Дубинин П.И.** Механизм разрушения камня единичным алмазным зерном при круглом шлифовании. – Технология машиностроения, №11, 2009.