

УДК.679.8.

**В. И. Сидорко**, докт. техн. наук; **В. В. Пегловский**, канд. техн. наук;  
**В. Н. Ляхов**, **Е. М. Поталыко**, инженеры

*Научно-технологический алмазный концерн «Алкон» НАН Украины,  
г. Киев, Украина*

## **ИЗУЧЕНИЕ ВЛИЯНИЯ МИНЕРАЛОГИЧЕСКИХ СОСТАВЛЯЮЩИХ ПРИРОДНОГО КАМНЯ НА ЕГО ПРОЧНОСТНЫЕ СВОЙСТВА**

*The effect of silicon, aluminum and iron oxides on the Mohs hardness of some types of natural stones has been discussed.*

При изготовлении изделий из природного камня [1] практически всегда возникает задача определения трудоемкости, особенно на стадии проектирования при рассмотрении различных вариантов технологического процесса.

Трудоемкость изготовления изделий из природного камня определяется прежде всего высокими прочностными свойствами обрабатываемого материала. Известен случай, когда процесс изготовления вазы из ревневской яшмы продолжался более 14 лет [2].

Вопросы определения трудоемкости изготовления изделий из природных камней в литературе описаны недостаточно.

В общем случае при классификации горных пород, например, по буримости, все природные горные породы распределены на 5 классов и 25 категорий. Известна также классификация пород по трудности разрушения (по В. В. Ржевскому) [3], согласно которой различные виды горных пород также разделены на 25 категорий.

Известны попытки объединить природные камни в группы по обрабатываемости, например, при изготовлении резных изделий [4], а также соизмерить обрабатываемость природных камней, сравнивая трудоемкость обработки одних камней с другими и пользуясь этим принципом, корректировать технологические режимы шлифования [5]. За образец природного камня, относительно которого приводятся данные по трудоемкости обработки других видов камня, принята калканская (техническая) яшма.

Трудоемкость изготовления является нормативным показателем качества изделий из природного камня [6], а при определении их стоимости, кроме известной методики [7] определения цены изделия в зависимости от общего веса камня в готовом изделии, следует учитывать трудозатраты, а также затраты, связанные с эксплуатацией специализированного оборудования и использованием дорогостоящего алмазно-абразивного инструмента.

Известно, что на трудоемкость изготовления изделий из природного камня оказывают влияние его прочностные свойства.

На прочностные свойства природных камней влияют несколько основных групп факторов:

условия образования природного камня (температура, давление, время образования, взаимодействие образовавшегося камня с внешней средой);

вид камня (минерал или горная порода);

вид минерала (монокристалл или поликристалл);

вид кристаллической решетки, присущей тому или иному минералу;

минералогический состав природного камня и некоторые другие.

Влияние прочностных свойств природного камня на трудоемкость его обработки в общем виде можно представить по аналогии с общим выражением для процесса шлифования [8]

$$T_o = f(\Pi),$$

где  $T_0$  – трудоемкость обработки определенного вида природного камня;

$\Pi$  – фактор, учитывающий прочностные свойства природного камня.

Под прочностными свойствами нами понимается способность природного камня оказывать сопротивление механической обработке.

Прочностные свойства природных камней характеризуются комплексом физико-механических свойств:

$$\Pi_{On} = f(\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_n, n),$$

где  $\Pi_{On}$  – прочностные свойства, определенные с учетом комплекса различных физико-механических свойств;

$\Pi_1, \Pi_2, \dots, \Pi_n$ , – исследуемые свойства;  $n$  – количество исследуемых свойств природного камня.

На прочностные свойства оказывают влияние вид, количество и процентное содержание минералогических элементов, входящих в состав природных камней

$$\Pi_1 = f\left(\sum_1^m p_m, c_m\right),$$

где  $p_m$  – процентное содержание всех минералогических составляющих в определенном виде камня;

$c_m$  – виды минералогических составляющих;

$m$  – количество минералогических составляющих, учитываемое при проведении исследования;

$\Pi_1$  – твердость по Моосу.

В данной статье нами рассматривается один показатель  $\Pi_1$ , характеризующий прочностные свойства природного камня, а именно, твердость по Моосу.

Для изготовления декоративно-художественных изделий применяется около 60 наименований природных камней, составляющих 2 большие группы: декоративные и полудрагоценные.

Известно, что в зависимости от минералогических составляющих природные камни делятся на 3 больших класса: кремнийсодержащие (кремень, халцедон и др.); кальцийсодержащие (оникс, мрамор и др.), а также их комбинации (лиственит, серпентинит и др.).

Из минералогических составляющих, входящих в состав натуральных камней, можно выделить 2 их основные группы. Оксиды (кремния, алюминия, железа и др.) и карбонаты (в основном, кальция и магния). Именно эти составляющие, доля которых в процентном отношении преобладает в минералогическом составе природных камней, оказывают наибольшее влияние на формирование прочностных свойств камня.

В данной работе рассматривалось влияние содержания оксидов кремния, алюминия и железа на прочностные свойства природных камней.

В зависимости от содержания указанных составляющих все разновидности природных камней, используемые в производстве декоративно-художественных изделий, были условно объединены в группы.

В табл. 1 приведено ориентировочное содержание рассматриваемых минералогических составляющих для выбранных групп природных камней (отмечено шрифтом).

Для изучения зависимостей влияния вида и процентного содержания минералогических элементов на прочностные свойства природных камней из рассматриваемых групп были выбраны некоторые виды природных камней по мере возрастания содержания выбранных минералогических элементов.

Данные о прочностных свойствах природных камней и содержании рассматриваемых минералогических составляющих являются усредненными значениями, полученными в результате анализа опубликованных данных [9–17].

Следует отметить, что кроме рассмотренных минералогических составляющих в составе природного камня (породах) могут присутствовать и некоторые другие, например: ок-

сиды титана ( $\text{TiO}_2$ –рутил, анатаз, брукит), железа ( $\text{FeO}(\text{OH})$ –гётит), марганца ( $\text{MnO}$ –псиломелан,  $\text{MnO}_2$ –пирролюзит,  $\text{MnO}(\text{OH})$ –манганит ), оксиды калия ( $\text{K}_2\text{O}$ ), натрия ( $\text{Na}_2\text{O}$ ), фосфора ( $\text{P}_2\text{O}_5$ ) и т. д.

Таблица 1. Особенности минералогического состава природного камня

Группа	Химическая формула или характеристика	$\text{SiO}_2$ [%]	$\text{Al}_2\text{O}_3$ [%]	$\text{Fe}_2\text{O}_3$ [%]	$\text{CaO}$ [%]	$\text{MgO}$ [%]	Прочие [%]
Мраморный оникс	$\text{CaCO}_3$	–	–	–	56	–	44
Мрамор	$\text{CaCO}_3$ , $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	27	–	1	22	16	34
Обсидиан	$\text{SiO}_2$	74	14	–	1	2	9
Серпентеит	$\text{Mg}_6(\text{OH})_8[\text{Si}_4\text{O}_{10}]$	44	25	5	1	14	11
Гранит	Кислые интрузивные породы	68	15	2,0	2,0	1,0	12
Яшма	$\text{SiO}_2$	88	5	1	4	1	1
Халцедон	$\text{SiO}_2$	95	2	–	2	1	–
Кремний и кварцитит	$\text{SiO}_2$	97	1	1	–	1	–
Нефрит	$\text{Ca}_2\text{Fe}_5[\text{Si}_4\text{O}_{11}]_2(\text{OH})_2$	51	6	2	17	21	3
Жадеит	$\text{Na}(\text{Al,Fe})\text{Si}_2\text{O}_6$	57	28	2	6	7	–



Рис. 1. Зависимость твердости по Моосу ( $P_i$ ) некоторых видов минералов и горных пород в зависимости от наличия в их составе оксида кремния.

симметризованные линейными зависимостями с использованием методом наименьших квадратов [18].

Содержание оксидов титана и магния в тех случаях, когда они присутствуют, как правило, не превышает 1 %. Поэтому в данной работе их влияние нами специально не рассматривается. Аналогичный вывод можно сделать по оксидам фосфора.

Влияние гидрооксидов железа ( $\text{FeO}(\text{OH})$ ) аналогично оксидам железа ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) однако, вероятно оно слабее, поскольку прочностные свойства чистого элемента гётита ниже, чем гематита.

Влияние оксидов калия ( $\text{K}_2\text{O}$ ) и натрия ( $\text{Na}_2\text{O}$ ) сопоставимо с влиянием оксидов кремния, но, очевидно, ниже, так как указанные составляющие являются основными составляющими полевого шпата, прочность которого ниже прочности кварца.

На рис. 1–3 представлены зависимости значений твердости по Моосу от содержания оксидов кремния, алюминия и железа, аппрок-

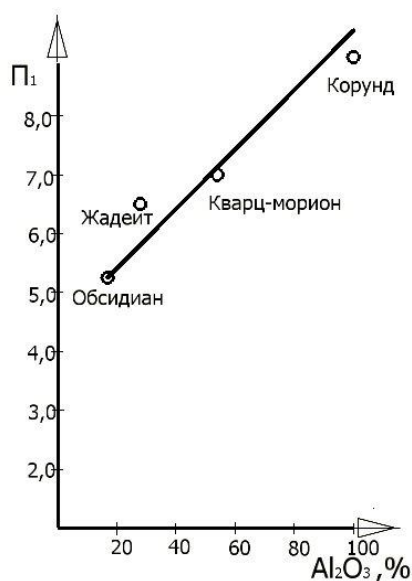


Рис. 2. Зависимость твердости по Моосу ( $P_i$ ) некоторых видов минералов и горных пород в зависимости от наличия в их составе оксида алюминия.

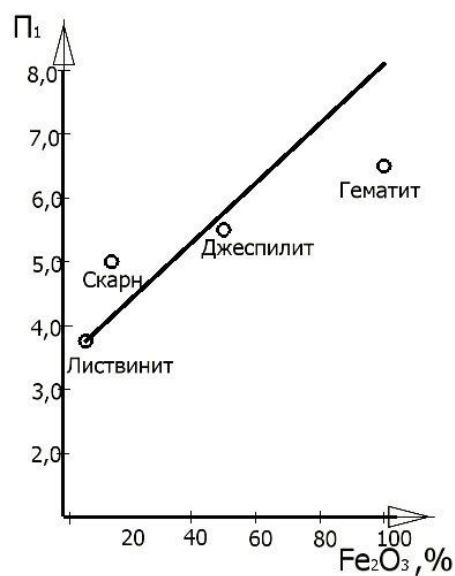


Рис. 3. Зависимость твердости по Моосу ( $P_i$ ) некоторых видов минералов и горных пород в зависимости от наличия в их составе оксида железа.

Зависимости, показанные на рис 1–3, не определяют конкретных количественных соотношений, а лишь показывают тенденции изменения прочностных свойств природных камней в зависимости от процентного содержания выбранных минералогических элементов.

Рассмотрим зависимости твердости по Моосу от содержания в минералогическом составе природного камня оксида кремния (рис. 1), оксида алюминия (рис. 2) и оксида железа (рис. 3).

Таким образом, для выбранных видов природных камней твердость по Моосу возрастает с увеличением содержания оксидов кремния, алюминия и железа.

Возрастание прочностных свойств с увеличением содержания оксидов кремния, алюминия и железа ограничивается стопроцентным содержанием указанных элементов, достигая максимальных значений у химически чистых элементов: кварца, корунда и гематита.

Таблица 2. Таблица сравнительного влияния содержания минералогических составляющих и их твердости по Моосу на прочностные свойства природных камней

Минералогические составляющие	Значения $\alpha$ [Ед.]	Значения $P_{1cp}$ [Ед.]	$K=\alpha \times P_{1cp}$ [Ед.]	K [%]
Оксиды алюминия	0,0626	7,125	0,446	100,0
Оксиды железа	0,0463	5,125	0,237	53,1
Оксиды кремния	0,0259	5,875	0,152	34,1

Из анализа зависимостей установлена различная степень влияния на прочностные свойства природного камня содержания выбранных минералогических элементов, которое может быть оценено по тангенсу угла наклона  $\alpha$  соответствующих графических зависимостей (табл. 2, столбец 2).

Однако на прочностные свойства природных камней, кроме процентного содержания минеральных элементов, оказывает влияние и прочность каждого из минералогических со-

ставляющих. Так как прочностные характеристики каждого из минералогических составляющих различны, то степень их влияния на общие прочностные свойства можно представить в виде обобщенного критерия влияния  $K_B$

$$K_B = \alpha \times \Pi_{1cp},$$

где  $K_B$  – обобщенный критерий влияния содержания минералогического составляющего и его средней прочности на общие прочностные свойства природного камня;

$\alpha$  – тангенс угла наклона графической зависимости  $\Pi_1 = f(\sum_1^m p_m, c_m)$  для каждого из

рассматриваемых минералогических элементов;

$\Pi_{1cp}$  – средние значения твердости для каждого из рассматриваемых минералогических составляющих в исследуемом интервале.

Как видно из табл. 2 (столбец 4) влияние рассматриваемых оксидов на общие прочностные свойства природного камня можно расположить по убыванию следующим образом: оксиды алюминия, железа, кремния. В процентном отношении это влияние показано в табл. 2 (столбец 5).

Следует отметить, что не все из полудрагоценных и декоративных камней могут быть полностью ранжированы в зависимости от выбранных принципов ввиду пересечения различных влияний составляющих элементов на прочностные свойства природных камней. Например, оксид железа является составляющей увеличивающей прочностные свойства кальцийсодержащих элементов и снижающий прочностные свойства кремнийсодержащих элементов. Это связано с тем, что в первом случае основной составляющей являются кальцийсодержащие элементы, прочность которых в чистом виде ниже оксида железа, а во втором – кремнийсодержащие элементы, прочность которых в чистом виде выше, чем прочность оксида железа.

### Выводы

1. На трудоемкость обработки природных камней оказывают влияние их прочностные свойства, которые зависят от вида и процентного содержания минералогических составляющих.

2. Минералогическими составляющими, повышающими прочностные свойства природных камней, являются оксиды алюминия, кремния и железа.

3. Наибольшее влияние на возрастание прочностных свойств природных камней оказывает содержание оксидов алюминия.

4. При сопоставлении степени влияния на возрастание прочностных свойств содержания оксидов железа и кремния выявлено большее влияние оксидов железа.

### Литература

1. Изделия камнерезные ТУ У 26.7. – 23504418 – 001: 2007.
2. Самсонов Я. П., Туринге А. П. Самоцветы СССР. – М.: Недра, 1984. – 335 с.
3. Добыча и обработка природного камня: Справочник / Под. ред. А. Г. Смирнова. – М. Недра, 1990. – 445 с.
4. Синкенкес Дж. Руководство по обработке драгоценных и поделочных камней. Пер. с англ. Л. В. Булгака. – М.: Мир, 1989. – 422 с.
5. Белицкая Э. И. Художественная обработка цветного камня // Учебник для средн. проф.-техн. училищ. – М.: Легкая и пищевая промышленность, 1983. – 200 с.
6. ДСТУ Б В.2.7-16-95. Строительные материалы. Материалы стеновые каменные. Номенклатура показаний качества.
7. Напівдорогоцінне каміння та вироби з нього // Коштовне та декоративне каміння. Інформ.-довідк. вид. – К.: Вид. ДГЦ МФУ, 2005. – 4, № 42. – С. 29–39.
8. Маслов Е. Н. Теория шлифования материалов. – М. Машиностроение, 1974. – 318 с.

9. Индутная Т. В. Полудрагоценные камни // Метод. руководство по диагностике и экспертизе. – К.: ГГЦ МФУ, 1997. – 43 с.
10. Минералы и самоцветы: знатокам, любителям и коллекционерам всех направлений о минералах и самоцветах: Справочник / Пер. с ит. Н. П. Григорьева. – М.: АСТ Астрель, 2006. – 320 с.
11. Стоялов С. П. Методические указания по поиску и перспективной оценке месторождений цветных камней. – Вып. 5. – Родонит / Под. ред. Е. А. Киевленко. – М.: ЦСПХП Мингеологии СССР ВГФ, 1975. – 51 с.
12. Сенкевич Н. Н. Методические указания по поиску и перспективной оценке месторождений цветных камней. – Вып. 6. – Жадеит / Под. ред. Е. А. Киевленко. – М.: ЦСПХП Мингеологии СССР ВГФ, 1975. – 56 с.
13. Лузина В. Р. и др. Методические указания по поиску и перспективной оценке месторождений цветных камней. – Вып. 10. – Изумруд / Под. ред. Е. А. Киевленко. – М.: ЦСПХП Мингеологии СССР ВГФ, 1975. – 54 с.
14. Григорович М. Е. Методические указания по поиску и перспективной оценке месторождений цветных камней. – Вып. 12. – Декоративно-облицовочные камни / Под. Ред. Е. А. Киевленко. – М.: ЦСПХП Мингеологии СССР ВГФ, 1977. – 90 с.
15. Григорович М. Е. и др. Методические указания по поиску и перспективной оценке месторождений цветных камней. – Вып. 14. – Окаменелое дерево и рисунчатый кремень / Под. ред. Е. А. Киевленко. – М.: ЦСПХП Мингеологии СССР ВГФ, 1976. – 60 с.
16. Морозова Н. И. и др. Методические указания по поиску и перспективной оценке месторождений цветных камней. – Вып. 15. – Гематит / Под. ред. Е. А. Киевленко. – М.: ЦСПХП Мингеологии СССР ВГФ, 1976. – 43 с.
17. Григорович М. Б. и др. Методические указания по поиску и перспективной оценке месторождений цветных камней. – Вып. 23. – Яшмы и роговики / Под. ред. Е. А. Киевленко. – М.: ЦСПХП Мингеологии СССР ВГФ, 1978. – 64 с.
18. Виноградов Ю. С. Математическая статистика и ее применение к исследованиям в текстильной и легкой промышленности. – М.: Легкая индустрия, 1964. – 320 с.

*Поступление 13.07.07.*