

## О ПРЕДЕЛЬНЫХ РАЗРЫВНЫХ НАПРЯЖЕНИЯХ КАК КРИТЕРИИ РАЗРУШЕНИЯ ГОРНЫХ ПОРОД ПРИ РЕЗКОМ ОХЛАЖДЕНИИ.

<sup>1</sup>Васильев Д.Л., <sup>2</sup>Ливак О.В., <sup>2</sup>Кравец В.И., <sup>3</sup>Ганкевич В.Ф., <sup>3</sup>Куц А.В.

<sup>1</sup>Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, <sup>2</sup>ГВУЗ «Украинский государственный химико-технологический университет», <sup>3</sup>Национальный технический университет «Днепропетровская политехника»

## ПРО ГРАНИЧНІ РОЗРИВНІ НАПРУЖЕННЯ ЯК ПРО КРИТЕРІЙ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ПРИ РІЗКОМУ ОХОЛОДЖЕННІ

<sup>1</sup>Васильєв Д.Л., <sup>2</sup>Лівак О.В., <sup>2</sup>Кравець В.І., <sup>3</sup>Ганкевич В.Ф., Куц О.В.

<sup>1</sup>Институт геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України, <sup>2</sup>ДВНЗ «Український державний хіміко-технологічний університет», <sup>3</sup>Національний технічний університет «Дніпровська політехніка»

## ABOUT ULTIMATE TENSILE STRESSES AS A CRITERION FOR THE ROCK DESTRUCTION AT SHOCK COOLING

<sup>1</sup>Vasiliev D. L., <sup>2</sup>Livak O. V., <sup>2</sup>Kravets V. I., <sup>3</sup>Gankevych V. F., <sup>3</sup>Kuts O. V.

<sup>1</sup>Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poliakov of National Academy of Sciences of Ukraine, <sup>2</sup>Ukrainian State University of Chemical Technology, <sup>3</sup>National Technical University «Dnipro Polytechnic»

**Аннотация.** Целью исследования было оценить возможность использования общепринятого критерия разрушения горных пород – предела прочности на растяжение  $\sigma_p$ , полученного механическими испытаниями для процессов растрескивания поверхностного слоя массива при резком охлаждении. В статье проанализированы основные способы получения  $\sigma_p$  при различных видах механических испытаний: прямое растяжение, раздавливание образцов неправильной формы, раскалывание пластин извне, раздавливание цилиндрических образцов по образующей давлением извне, раздавливание образцов давлением изнутри, поперечный изгиб породных дисков, опертых по контуру. Показана существенная зависимость предела прочности от схем механических нагрузжений. Проведено сравнение реальных напряжений возникающих в горной породе при резком охлаждении с полученными стандартными испытаниями. Экспериментально установлено, что проанализированные перепады температур могут приводить к появлению только редких одиночных трещин в стекле. Для образования макротрещин в породе - гранит необходимы более высокие значения разности температур. Рассмотрен вопрос критических разрывных напряжений в предположении, что в горной породе имеются микротрещины, выходящие на поверхность, которые развиваются в поле всесторонних растягивающих напряжений, создающихся в тонком поверхностном слое. Установлено, что предельные напряжения слоя полупространства зависят от наличия и величины микротрещин в породе. Приведены значения длины микротрещин для некоторых горных пород, которые приводятся в движение перепадами температур в интервале от 100 до 600 °С. Отмечено, например, для гранита, что длины естественных микротрещин в породе, наиболее чувствительных к термическому разрушению, начинают расти при напряжениях, создающихся с перепадами температур от 100 до 400 °С, что близко к практике. Основываясь на результатах, показано нецелесообразность использования стандартных показателей предела прочности горных пород на разрыв для оценки процессов растрескивания поверхности горных пород при термоударе охлаждением, так как реальное разрушение поверхностного слоя пород наступает при напряжениях разрыва существенно превышающих стандартные предельные напряжения.

**Ключевые слова:** горная порода, термические напряжения, интенсивное охлаждение, система микротрещин.

Воздействие резким охлаждением на поверхность горных пород достаточно высоким перепадом температур является эффективным средством разупрочнения массива [1].

При этом охлаждение может осуществляться как низкотемпературными хладагентами по породе находящимися в естественном состоянии, так и термоциклическим нагружением, когда порода вначале нагревается, а затем охлаждается водой.

Эффективность такого способа воздействия объясняется тем, что при охлаждении поверхности в ней развиваются всесторонние растягивающие (усадочные) напряжения, а известно, что сопротивляемость пород на разрыв на порядок ниже, чем сопротивляемость сжатию.

Если рассматривать горную породу как изотропное, упругое твердое тело со свойствами, не зависящими от температуры в рассматриваемом диапазоне нагрева или охлаждения, то при резком охлаждении поверхности породы в верхнем слое параллельно границе возникают равные растягивающие напряжения [2]

$$\sigma_* = \frac{\beta E \Delta T}{1 - \mu} \quad (1)$$

где  $E$  – модуль Юнга породы;  $\beta$  – коэффициент линейного расширения породы;  $\Delta T$  – разность температур между начальной температурой породы  $T_0$  и температурой охлаждающей среды  $\Delta T = T_0 - T_{ox}$ ;  $\mu$  – коэффициент Пуассона породы.

Возникновение разрывных напряжений в полупространстве при резком охлаждении схематически показано на рис. 1.

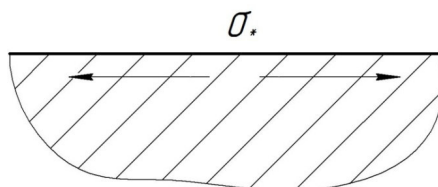


Рисунок 1 — растягивающие напряжения в полупространстве горной породы при резком охлаждении.

При этом интенсивность охлаждения предполагается достаточно высокой, близкой к граничным условиям I рода (ГУ I рода). В работе [3] показано, что наиболее энергетически выгодно, с точки зрения теплового удара, увеличение коэффициента теплосъема  $\alpha$  до пределов порядка  $10^4$  Вт/м<sup>2</sup>·К и дальнейшее его увеличение не влияет на условия протекания теплового удара, то есть можно считать, что применение охлаждающих струй с  $\alpha > 10^4$  Вт/м<sup>2</sup>·К в расчетном плане удовлетворяет ГУ I рода.

Следует предположить, что разрыв поверхностного слоя горной породы наступит тогда, когда создающиеся в породе термические напряжения превысят предельные  $\sigma_p$ , которые рассматриваются как сопротивляемость горных пород растяжению (разрыву) и определяются, как правило, экспериментально [4].

Существует много способов экспериментального определения значения  $\sigma_p$  для каждой конкретной горной породы. Среди основных способов следует выделить такие: прямое растяжение, раздавливание образцов неправильной формы, раскалывание пластин давлением извне, раскалывание цилиндрических образцов по образующей давлением извне, раздавливание образцов давлением изнутри, поперечный изгиб породных дисков, опертых по контуру. В таблице 1 приведены экспериментальные значения сопротивляемости гранита растяжению  $\sigma_p$  для различных способов испытаний.

Таблица 1 — Значение пределов прочности гранита на растяжение  $\sigma_p$  в зависимости от схемы испытаний образцов.

Порода	Схема испытаний	$\sigma_p, 10^{-5} \text{ Н} \cdot \text{м}^2$
Гранит	1. Прямое растяжение	60,8
	2. Раздавливание образцов неправильной формы	121,6
	3. Раскалывание пластин давлением извне	156,7
	4. Раздавливание цилиндрических образцов по образующей давлением извне	97,4
	5. Раздавливание образцов давлением изнутри	40,5
	6. Поперечный изгиб породных дисков, опертых по контуру.	134,1

Из таблицы 1 следует, что показатели сопротивляемости разрыву одной и той же горной породы при различных способах испытаний могут существенно различаться по величине. Например, диапазоны средних значений временного сопротивления разрыву  $\sigma_p$  гранита, полученных различными способами составили  $40,5 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2 - 156,7 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$  – разница в 3,9 раза.

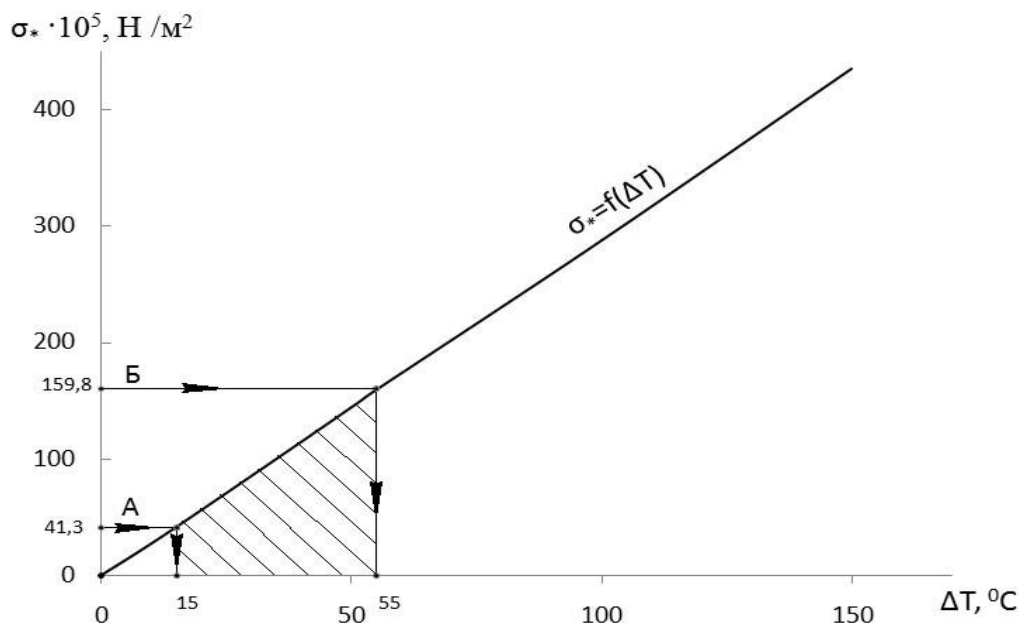
В большинстве аналитических формул расчета процессов и средств разрушения горных пород на основе применения методов механики сплошной среды и классических теорий прочности сопротивляемость горных пород оценивается величиной их временного сопротивления растяжению  $\sigma_p$ . Способов экспериментального определения данного показателя при этом не указывается; остается предположить, что подразумевается использование обычного метода механических испытаний прямого растяжения образцов.

Оценим, как соотносятся величины термических напряжений, например, в граните, при резком охлаждении поверхности с предельными разрывными напряжениями полученными различными способами.

Графическая зависимость возникающих разрывных напряжений в поверхностном слое гранита от перепада температур  $\Delta T$  приведена на рис.2. Свойства гранита приняты следующими:  $\beta = 10^{-5} \text{ 1/К}$ ,  $E = 2,6 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$ ,  $\mu = 0,1$ .

Если на прямой  $\sigma_* = f(\Delta T)$  отложить точки предельных разрывных напряжений  $\sigma_p$  для различных схем испытаний, то можно увидеть перепады температур  $\Delta T$  при которых должно наступать предельное состояние  $\sigma_* = \sigma_p$

и поверхность горной породы – гранита должна разрушаться трещинами. Точка А соответствует минимальному значению  $\sigma_p = 40,5 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$  при испытаниях раздавливанием образцов давлением изнутри и Б – максимальному значению  $\sigma_p = 156,7 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$  при испытаниях раскалыванием пластин давлением извне. Из рисунка видно, что предельное состояние поверхности гранита должно наступать уже при перепадах температур  $\Delta T = 15 - 55^\circ\text{С}$ .



А — сопротивляемость гранита на разрыв при раздавливании образцов давлением изнутри;  
 Б — сопротивляемость гранита на разрыв при раскалывании пластин давлением извне

Рисунок 2 — Зависимость термических растягивающих напряжений на поверхности гранита от перепада температур при резком охлаждении

К аналогичному выводу пришли авторы [5], указывая, что уже при перепадах температур  $\Delta T = 30 - 40^\circ\text{C}$  может наступать разрушение стенок бурящейся скважины при резком охлаждении. Однако, экспериментальные исследования, проведенные нами, показывают, что такие перепады температур могут приводить к появлению редких одиночных трещин в стекле. Для образования макротрещин в граните необходимы более высокие значения разности температур  $\Delta T = 150 - 200^\circ\text{C}$  и более, с разрывными напряжениями  $\sigma_* > 432 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$ . Напряжение при котором наступает реальный разрыв полупространства растягивающими напряжениями в 2,75 раза больше, чем предельное  $\sigma_p = 156,7 \cdot 10^5 \text{ Н/м}^2$  полученное механическими испытаниями по схеме 3 в таблице 1.

В случае охлаждаемого полупространства для получения достоверных данных по  $\sigma_p$  необходимо провести механические испытания по схеме нагружения близкой к той, которая имеет место при резком охлаждении поверхностного слоя горной породы, а именно, каким-то образом, в тонком

поверхностном слое полупространства создать механические всесторонние разрывные напряжения и фиксировать начало момента появления трещин. При этом, необходимо учесть тот факт, что в этом случае отделения кусков породы или разделения полупространства на отдельные части не будет. Сделать все это – весьма затруднительно.

Рассмотрим вопрос критических разрывных напряжений в поверхностном слое в предположении наличия в горной породе микротрещиноватости.

Пусть на поверхности забоя имеется одиночная трещина длиной  $l$ , выходящая на поверхность (рис. 3).

Поверхность забоя подвержена действию растягивающих напряжений  $\sigma_1$ . Напряжения являются следствием резкого охлаждения забоя. Согласно [6] длина начальных (естественных) микротрещин, играющих роль в термических методах разрушения составляет 0,048-0,85 мм.

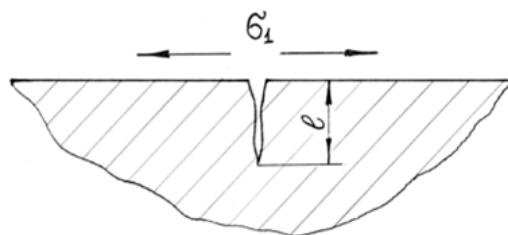


Рисунок 3 — Схема к расчету характера развития одиночной трещины в поле растягивающих напряжений

Так как слой напряженной породы достаточно тонкий, а время его формирования в условиях термоудара мало (доли секунды) то будем считать:

- 1) на поверхности забоя всегда имеется хотя бы одна микротрещина, выходящая на поверхность;
- 2) длина трещины и толщина напряженного слоя соизмеримы;
- 3) напряжение  $\sigma_1$  в поверхностном слое постоянно по всей длине трещины.

Согласно теории равновесных трещин - трещина неподвижна, если  $\pi N_0 < K$ , где  $N_0$  – коэффициент интенсивности напряжений, определяемый как предел величины  $\sigma_{p(S)} \cdot S^{1/2}$  при  $S \rightarrow 0$ ;  $\sigma_{p(S)}$  – напряжение на продолжении трещины на расстоянии  $S$  от ее конца;  $K$  – модуль сцепления, равный предельно допустимой в вершине трещины интенсивности напряжений (константа материала).

Коэффициент интенсивности напряжений  $N_0$  для трещины, выходящей на границу полуплоскости, и подверженной воздействию поверхностных растягивающих напряжений описывается уравнением

$$N_0 = \frac{\sqrt{2l}}{\pi} \int_0^l \frac{\sigma(x) dx}{\sqrt{l^2 - x^2}} \quad (2)$$

Если рассматривать задачу как квазистатическую, приняв  $\sigma(x) = \sigma_1$ , то уравнение (2) будет иметь вид:

$$N_0 = \frac{\sqrt{2l}\sigma_1}{\pi} \int_0^l \frac{dx}{\sqrt{l^2 - x^2}};$$

Интеграл  $\int_0^l \frac{dx}{\sqrt{l^2 - x^2}}$  имеет решение  $\int_0^l \frac{dx}{\sqrt{l^2 - x^2}} = \arcsin \frac{x}{l} \Big|_0^l$

Отсюда

$$N_0 = \frac{\sqrt{2l}}{\pi} \sigma_1 \arcsin \frac{x}{l} \Big|_0^l = \frac{\sqrt{2l}}{\pi} \sigma_1 (\arcsin 1 - \arcsin 0) = \frac{\sigma_1 \sqrt{l}}{\sqrt{2}} \quad (3)$$

Так как условие развития трещины  $\pi N_0 \geq K$ , то из (3) имеем

$$\sigma_1 = \frac{\sqrt{2}K}{\pi\sqrt{l}} \quad (4)$$

Следует отметить, что зависимость (4) совпадает с формулой Гриффитса для бесконечной пластины с прямолинейной трещиной, растянутой внешними напряжениями  $\sigma_*$ , направленными перпендикулярно к линии ориентации трещины [7]:

$$\sigma_* = \frac{K\sqrt{2}}{\pi\sqrt{l_*}} \quad (5)$$

где  $l_*$  - длина трещины, при которой тело будет разрушено, если его нагрузить равномерно распределенной нагрузкой  $\sigma_*$ .

Из зависимости (4) следует, что

$$l = \frac{2K^2}{\sigma_1^2 \pi^2} \quad (6)$$

Формула показывает, какой длины естественную трещину в породе приведет в движение напряжение  $\sigma_1$ . Подставим в (6) вместо  $\sigma_1$  значение напряжения  $\sigma_* = \frac{\beta E(T_{нагр} - T_{охл})}{1 - \mu}$  которое возникает в породе при резком охлаждении от  $T_{нагр}$  до  $T_{охл}$

$$\Delta T = T_{нагр} - T_{охл}$$

Получим зависимость

$$l = \frac{2(1 - \mu)^2 K^2}{\pi^2 \beta^2 E^2 \Delta T^2} \quad (7)$$

Определим длину естественных микротрещин в горных породах, которые придут в движение от перепада температур на поверхности  $\Delta T$ . ( $\Delta T$  принимаем от  $100^{\circ}\text{C}$  до  $800^{\circ}\text{C}$ ). Физико-механические свойства для пород: гранит, оленегорский железистый кварцит и песчаник взяты из [6, 8, 9].

Данные расчета показаны в таблице 2.

Таблица 2 — Длина трещины, которую приводит в движение перепад температур  $\Delta T$ .

Порода	Перепад температур $\Delta T$ , $^{\circ}\text{C}$	Длина трещины, м	Длина трещины, мм
1	2	3	4
Гранит	100	0,0007	0,7
	200	0,00017	0,17
	300	0,000077	0,077
	400	0,000043	0,043
	500	0,000028	0,028
	600	0,000019	0,019
	700	0,000018	0,018
Оленегорский железистый кварцит	100	0,00105	1,05
	200	0,000262	0,26
	300	0,000116	0,12
	400	0,000066	0,066
	500	0,000042	0,042
	600	0,000029	0,029
	700	0,000021	0,021
Песчаник	100	0,0165	16,5
	200	0,00412	4,12
	300	0,00183	1,83
	400	0,00103	1,03
	500	0,00066	0,66
	600	0,00046	0,46
	700	0,00034	0,34
	800	0,00025	0,25

Таблица 2 дает представление о том, какие естественные трещины, выходящие на поверхность горной породы, придут в движение при создании заданного перепада температур  $\Delta T$ . Например, при резком охлаждении поверхности гранита с  $600^{\circ}\text{C}$  до  $0^{\circ}\text{C}$ , в движение придут все трещины, выходящие на поверхность, длина которых больше 0,019мм.

Анализ таблицы показывает, что длины микротрещин поверхностного слоя (например, гранита), которые приводятся в движение перепадами температур  $\Delta T = 100 - 400^{\circ}\text{C}$  при резком охлаждении  $l=0,7-0,043$  мм близки к размерам естественных микротрещин наиболее чувствительных к термическим способам воздействия  $l=0,85-0,048$  мм. Это как раз и подтверждает тот факт, что видимые макротрещины в граните, начинают проявляться, при перепадах температур

начиная с 200<sup>0</sup>С, при напряжениях существенно превышающих значения предельных, полученных при стандартных испытаниях.

Отсюда следует вывод, что оценка предельного состояния поверхностного слоя горных пород в условиях термоудара охлаждением с позиций: «горная порода - трещиноватая среда» является наиболее приемлемой.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Кожевников А.А., Крисан В.В., Вахалин Ю.Н., Третьяков О.А., Ливак О.В. Разрушение горных пород при резком охлаждении: монография. Днепропетровск:ТОВ «Лизунов Прес», 2011. 36 с.
2. Коваленко А.Д. Термоупругость. Киев: Вища школа, 1976. 216с.
3. Дмитриев А.П., Кузьяев Л.С., Гончаров С.А. Исследование характера поведения горных пород в условиях термического удара. Исследование физических свойств горных пород. М.:Недра, 1967. с.7-17.
4. Барон Л.И., Керелица .Г. Сопrotивляемость горных пород отрыву. Киев: Наук.думка, 1974. 191 с.
5. Тимофеев Н.С., Яремийчук Р.С., Байдюк Б.В. Аналитическая и экспериментальная оценка влияния термических напряжений на устойчивость стенок скважины. Науч.тр. ВНИИ буровой техники. Крепление скважины. 1968. Вып. 23. с.121-136.
6. Дмитриев А. П., Гончаров С. А., Германович Л. Н. Термическое разрушение горных пород. М.: Недра, 1990. 255 с.
7. Панасюк В. В. Предельное равновесие тел с трещинами. Киев: Наук. думка, 1968. 437с.
8. Москалев А.Н., Пигида Е.Ю., Керелица Л.Г., Вахалин Ю.Н. Разрушение горных пород при термоциклическом воздействии Киев : Наук. думка, 1987. 248 с
9. Дмитриев А. П., Гончаров С. А. Термическое и комбинированное разрушение горных пород. М.: Недра, 1978. 304с.

#### REFERENCES

1. Kozhevnikov A.A., Krisan V.V., Vakhalin Yu.N., Tretiakov O.A., Livak O.V. (2011), *Razrushenie gornykh porod pri rezkom okhlazhdenii: monografiia* [Destruction of rocks during shock cooling: monograph]. Lizunov Press LLC, Dnipropetrovsk, UA.
2. Kovalenko A.D. (1976), *Termouprugost* [Thermoelasticity], Higher School, Kyiv, SU.
3. Dmitriev A.P., Kuzyaev L.S. and Goncharov S.A. (1967), *Issledovanie kharaktera povedeniia gornykh porod v uslviviiakh termicheskogo udara. Issledovanie fizicheskikh svoistv gornykh porod* [Investigation of the nature of rock behavior in thermal shock conditions. Investigation of physical properties of rocks], Nedra, Moscow, SU.
4. Baron L.I. and Kerelitsa L.G. (1976), *Soprotivliaemost gornykh porod otrывu* [Resistance rocks separation], Naukova dumka, Kyiv, SU..
5. Timofeev N.S., Yaremichko R.S. and Badyuk B.V. (1968), "Analytical and experimental evaluation of the effect of thermal stresses on the stability of well walls", Nauch.tr. VNIИ of Drilling Equipment. Well fixing. Vip. 23. pp. 121-136.
6. Dmitriev A.P., Goncharov S.A. and Germanovich L.N. (1990), *Termicheskoe razrushenie gornykh porod* [Thermal destruction of rocks], Nedra, Moscow, SU.
7. Panasyuk V.V. (1968), *Predelnoe ravnovesie tel s treshchinami* [Limit equilibrium of bodies with cracks], Scientific Thought, Kyiv, SU.
8. Moskalev A.N., Pigida Ye.Yu., Kerekilitsa L.G. and Vakhalin Yu.N. (1987), *Razrushenie gornykh porod pri termotsiklicheskom vozdeystvii* [Destruction of rocks during thermal cycling], Scientific Thought, Kyiv, SU.
9. Dmitriev A.P. and Goncharov S.A. (1978), *Termicheskoe i kombinirovannoe razrushenie gornykh porod* [Thermal and combined destruction of rocks], Nedra, Moscow, SU.

#### Об авторах

**Васильев Дмитрий Леонидович**, доктор технических наук, научный сотрудник в отделе механики эластомерных конструкций горных машин, Институт геотехнической механики Национальной академии наук Украины (ИГТМ НАН Украины), Днепр, Украина.

**Ливак Оксана Викторовна**, магистр, ассистент кафедры материаловедства, Украинский государственный химико-технологический университет, Днепр, Украина, [Roxiki@i.ua](mailto:Roxiki@i.ua)

**Кравец Василий Иванович**, кандидат технических наук, доцент, кафедра материаловедства, Украинский государственный химико-технологический университет, Днепр, Украина.

**Ганкевич Валентин Феоодсьевич**, кандидат технических наук, доцент, кафедра горных машин, НТУ «Днепровская политехника», Днепр, Украина, [gankevich@i.ua](mailto:gankevich@i.ua).

**Куц Александра Вадимовна**, студентка, НТУ «Днепровская политехника», Днепр, Украина, [sashettes@gmail.com](mailto:sashettes@gmail.com).

#### About the authors

**Vasyliiev Dmytro Leonidovych**, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Researcher on the Department of Elastomeric Component Mechanics of Mining Machines, Institute of Geotechnical Mechanics named by N. Poliakov of National Academy of Sciences of Ukraine (IGTM, NAS of UKRAINE), Dnipro, Ukraine

**Livak Oksana Viktorivna**, Master of Science, Assistant of the Department of of Material Science, Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine, [Roxiki@i.ua](mailto:Roxiki@i.ua)



**Kravets Vasyly Ivanovych**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Associate Professor in the Department of Material Science, Ukrainian State University of Chemical Technology, Dnipro, Ukraine.

**Gankevych Valentyn Feodosiiovych**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D), Associate Professor in the Department of Mining Machines, National Technical University "Dnipro Polytechnic", Dnipro, Ukraine, [gankevich@i.ua](mailto:gankevich@i.ua)

**Kuts Oleksandra Vadymivna**, student of National Technical University "Dnipro Polytechnic", Dnipro, Ukraine, [sashettes@gmail.com](mailto:sashettes@gmail.com)

**Анотація.** Метою дослідження було оцінити можливість використання загально прийнятого критерію руйнування гірських порід – границі міцності на розтяг  $\sigma_p$ , отриманої механічними випробуваннями для процесів розтріскування поверхневого шару масиву при різкому охолодженні. У статті проаналізовано основні способи отримання  $\sigma_p$  при різних видах механічних випробувань: пряме розтягування, роздавлювання зразків неправильної форми, розколювання пластин ззовні, роздавлювання циліндричних зразків тиском по твірній ззовні, роздавлювання зразків тиском зсередини, поперечний згин породних дисків, опертих по контуру. Показана суттєва залежність границі міцності від схем механічних навантажень. Проведено порівняння реальних напружень, що виникають в гірській породі при різкому охолодженні, з напруженнями, отриманими стандартними випробуваннями. Експериментально встановлено, що проаналізовані перепади температур можуть призводити до появи тільки поодиноких тріщин у склі. Для утворення макротріщин в породі граніт необхідні більш високі значення різниці температур. Розглянуто питання критичних розривних напружень у припущенні наявності в гірській породі мікротріщин, що виходять на поверхню та розвиваються в полі всебічних розтягувальних напружень, які створюються в тонкому поверхневому шарі. Встановлено, що граничні напруження шару півпростору залежать від наявності і величини мікротріщин в породі. Наведені значення довжини мікротріщин для деяких гірських порід, які приводяться в рух перепадами температур в інтервалі від 100 до 600 °С. Відзначено, наприклад, для граніту, що довжини природних мікротріщин в породі, найбільш чутливих до термічного руйнування, починають рости при напруженнях, створених перепадами температур від 100 до 400 °С, що близько до практики. Грунтуючись на результатах, показано недоцільність використання стандартних показників границі міцності гірських порід на розрив для оцінки процесів розтріскування поверхні гірських порід при термоударі охолодженням, оскільки реальне руйнування поверхневого шару порід настає при напруженнях розриву, що істотно перевищують стандартні граничні напруження.

**Ключові слова:** гірська порода, термічні напруження, інтенсивне охолодження, система мікротріщин.

**Annotation.** The purpose of the research was to estimate a possibility of using the generally accepted criterion of the rock destruction - the tensile strength  $\sigma_t$  obtained by mechanical tests - for the processes of cracking of the surface layer of the massif at its shock cooling. The authors analyze main methods of obtaining  $\sigma_t$  for various types of mechanical tests: direct tension, crushing of samples of irregular shape, plates fissuring from the outside, crushing of cylindrical samples along the generatrix by external pressure, crushing of samples by internal pressure, cross-bending of rock disks supported along the contour. In the article, a significant dependence of tensile strength on mechanical loading schemes is shown. Real stresses arising in the rock at shock cooling are compared with stresses obtained by standard tests. It is experimentally established that the analyzed temperature differences can lead to the appearance of only rare single cracks in the glass. For the formation of macrocracks in the granite rock, higher values of temperature difference are necessary. The issue of critical tensile stresses is considered with the assumption that there are cropping-out microcracks in the rock, which are developed in the field of all-around tensile stresses created in a thin surface layer. It is further established that ultimate stresses of the half-space layer depend on the presence and magnitude of microcracks in the rock. The values of the microcrack length are given for some rocks, which start to move under the action of temperature differences within the range of 100-600 °C. It is noted that, for example, for granite, lengths of natural microcracks in the rocks, which are most sensitive to thermal destruction, begin to grow at stresses created at temperature differences within the range of 100-400 °C, which is close to practical conditions. Based on the results, it is shown that it is inexpedient to use standard indicators of the rock tensile strength for evaluating the processes of the rock surface cracking at thermal shock cooling, since actual destruction of the surface layer of the rocks occurs at tensile stresses significantly exceeding the standard ultimate stresses.

**Key words:** rock, thermal stresses, intensive cooling, microcrack system.

*Стаття надійшла до редакції 10.02. 2020*

*Рекомендовано до друку д-ром техн. наук Л.М. Васильєвим*