

## ПОВЕРХНОСТНО-АКТИВНЫЕ ВЕЩЕСТВА КАК ДЕСТАБИЛИЗАТОРЫ УПРУГО-ПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ГОРНЫХ ПОРОД

**Я. С. Долударева, В. Д. Кулинич, Т. Ф. Козловская, В. Н. Долударев**

Кременчугский национальный университет имени Михаила Остроградского  
ул. Первомайская, 20, 39600, г. Кременчуг, Украина.

E-mail: tehm@kdu.edu.ua; tfk58@kdu.edu.ua

Исследовано влияние воды как поверхностно-активного вещества и водных растворов органических поверхностно-активных веществ на изменение прочностных свойств горных пород различной геоморфологической природы. Показано, что воздействие органических поверхностно-активных веществ на горную породу по всей ее поверхности и только на поверхность внутри шпуров отличается по характеру с физико-химической точки зрения, что находит свое отображение в изменении физико-механических свойств, в частности прочностных, исследованных типов горных пород – лабрадорита, гранита, песчаника, мрамора.

**Ключевые слова:** горные породы, органические поверхностно-активные вещества, механохимические характеристики, упругопластические свойства.

## ПОВЕРХНЕВО-АКТИВНІ РЕЧОВИНИ ЯК ДЕСТАБІЛІЗАТОРИ ПРУЖНО-ПЛАСТИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ГІРСЬКИХ ПОРІД

**Я. С. Долударєва, В. Д. Кулинич, Т. Ф. Козловська, В. М. Долударєв**

Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського  
ул. Першотравнева, 20, 39600, м. Кременчук, Україна.

E-mail: tehm@kdu.edu.ua; tfk58@kdu.edu.ua

Досліджено вплив води як поверхнево-активної речовини та водних розчинів органічних поверхнево-активних речовин на зміни міцносних властивостей гірських порід різної геоморфологічної природи. Показано, що вплив органічних поверхнево-активних речовин на гірську породу по всій її поверхні і тільки на внутрішню поверхню шпурів відрізняється за характером із фізико-хімічної точки зору, що знаходить своє відображення в змінах фізико-механічних властивостей, зокрема міцносних, досліджених типів гірських порід – лабрадориту, граніту, песчаника, мармура.

**Ключові слова:** гірські породи, органічні поверхнево-активні речовини, механохімічні характеристики, пружно-пластичні властивості.

**АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ.** В настоящее время разрушение горных пород рассматривается как сложный физико-химический процесс, характер развития которого зависит от величины и скорости приложения нагрузки, напряженного состояния объекта, его прочности и структурных свойств. В соответствии с этим рациональным является рассмотрение этого процесса на микроскопическом уровне [1], в рамках которого разрушение возникает в месте контакта разрушающего элемента с породой и сопровождается разрывом связей между зернами

## ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ

---

или нарушением химических связей в кристалле, появлением микротрещин, а также его сдвигом вдоль поверхностей скольжения.

Гильвари [2] представляет механизм разрушения единичного элементарного объема (зерна) как процесс активации дефектов кристаллической решетки под влиянием подведенной энергии до образования трещины и ее раскрытия. В этом процессе каждый вид дефекта (реберный, поверхностный, объемный) способствует дроблению кристалла на вполне определенные частицы, распределение которых по размерам подчиняется статистическим и импульсным закономерностям. В результате исследований [3, 4] было установлено, что в случае монолитной породы (известняк) растрескивание происходит из-за активизации реберных трещин, разрушение порфира (горная порода с крупными включениями) осуществляется по поверхностным трещинам.

Максимальной прочностью обладает гипотетическое твердое тело с бездефектным кристаллическим строением, т.е. тело имеет идеальную или теоретическую прочность. Реальная прочность всегда меньше идеальной из-за наличия в кристаллической решетке дефектов. Горная порода всегда имеет различные дефекты, которые присущи кристаллическому строению минералов [5].

В минералах дефекты могут быть точечными (примеси, вакансии и т.п.), линейными (краевые и винтовые дислокации), объемными (породы и трещины). В горных породах, кроме дефектов, содержащихся в минералах, в качестве таковых выступают границы зерен, слоев и т.п. Число различных дефектов в данной породе, как и влияние данного дефекта на прочность породы, зависит от ее строения, внешних условий и режимов разрушения. Влияние дефектов заключается в том, что они уменьшают действующую площадь сечения образца, т.е. площадь сечения, к которой приложена растягивающая сила. Кроме этого, вблизи дефектов концентрируются напряжения, а значит и энергия. Дефекты повышают среднее напряжение в материале, что может приводить к разрыву связей между ионами (или атомами) и разрушению тела. Следовательно, изменяя внешние условия, можно изменять прочность материала.

Прочность минерала зависит от свободной поверхностной энергии, значение которой можно изменять при помощи добавления поверхностно-активных веществ (ПАВ) неорганической и органической природы, сорбирующихся на поверхности минералов.

Цель работы – изучение влияния поверхностно-активных веществ на прочностные свойства пород различной крепости и объяснение процессов, происходящих при этом воздействии.

**МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.** Экспериментальные исследования влияния органических поверхностно-активных веществ в зоне разрушения на изменение прочности моделей из различных типов горных пород (лабрадорит, гранит, мрамор и песчаник) проводили в лаборатории кафедры технической механики Кременчугского национального университета имени Михаила Остроградского.

## ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ

В *первой серии* экспериментов пять произвольно выбранных моделей – эталонные образцы – разрушали статической нагрузкой, создаваемой испытательной машиной EDZ–100, и определяли предел прочности при одноосном сжатии. Результаты исследований приведены в табл. 1.

Таблица 1– Предел прочности эталонных образцов из горных пород

Порода	Образцы	Предельная нагрузка при одноосном сжатии, кН	Предел прочности при одноосном сжатии, МПа	Ср. значение предела прочности при одноосном сжатии, МПа	Отклонение предела прочности образцов от среднего значения, %	Уточн. предел прочн., МПа
Лабрадорит	1	142	88,7	98,74	10,2	98,74
	2	168	105		6,3	
	3	140	87,5		11,4	
	4	182	113,75		15	
	5	158	98,75		0	
Гранит	1	204	127,5	151,5	15,8	151,5
	2	272	170		12,2	
	3	256	160		5,6	
	4	210	131,25		13,4	
	5	270	168,75		11,4	
Песчаник	1	178	111,25	105,87	5	105,87
	2	150	93,75		11	
	3	180	112,5		6,3	
	4	181	113,12		6,8	
	5	158	98,75		6,7	
Мрамор	1	146	91,25	99,88	8,6	99,88
	2	154	96,25		3,6	
	3	172	107,5		7,6	
	4	155	96,9		3	
	5	172	107,5		7,6	

Во *второй серии* экспериментов изучали изменение прочностных характеристик горных пород под воздействием органических ПАВ, для чего образцы помещали в раствор органического поверхностно-активного вещества (состав: анионоактивные ПАВ 15–30 %, неионогенные ПАВ <5 %) с водой (1:6 – данная концентрация установлена ранее, как наиболее оптимальная) и в воду, где выдерживали их в течение одного часа. После этого образцы нагружали статической нагрузкой до разрушения, определяя их предел прочности.

Для изучения изменения механических характеристик пород образцы дополнительно помещали в емкость с водой, которая также обладает способностью к поверхностному натяжению. Результаты экспериментов приведены в табл. 2.

**ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ  
РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ**

**Таблиця 2 – Предел прочности образцов после воздействия на них воды  
и раствора ПАВ в течение одного часа**

Порода	Жидкость	Образцы	Предельная нагрузка при одноосном сжатии, кН	Предел прочности при одноосном сжатии, МПа	Среднее значение предела прочности при одноосном сжатии, МПа	Отклонение предела прочности образцов от среднего значения, %	Уточненный предел прочности, МПа
Лабрадорит	ПАВ	1	136	85	70,36	21*	72,68
		2	115	71,8		2	
		3	112	70		0,5	
		4	78	48,75		30*	
		5	122	76,25		8,3	
	Вода	1	77	48,12	81,23	40*	79,37
		2	134	83,75		3,1	
		3	120	75		7,7	
		4	160	100		23*	
		5	159	99,3		22,2*	
Гранит	ПАВ	1	214	133,75	118,5	12,9	118,5
		2	206	128,75		8,6	
		3	202	126,25		6,5	
		4	158	98,75		16,7	
		5	168	105		11,4	
	Вода	1	192	120	113,66	5,6	120
		2	190	118,75		4,5	
		3	182	113,75		0,1	
		4	204	127,5		12,2	
		5	141	88,13		22,5*	
Песчаник	ПАВ	1	155	96,8	82,73	17	82,73
		2	120	75		9	
		3	121	75,6		8,6	
		4	128	80		3,3	
		5	138	86,25		4,3	
	Вода	1	220	137,5	106,5	29*	98,75
		2	148	92,5		13	
		3	179	111,9		5	
		4	145	90,4		15	
		5	160	100,2		5,9	
Мрамор	ПАВ	1	127	79,4	82,01	3,1	82,01
		2	138	86,25		5,2	
		3	148	92,5		13	
		4	131	81,9		0,1	
		5	112	70		15	
	Вода	1	136	85	88,9	4,4	88,9
		2	140	87,5		1,6	
		3	120	75		16	
		4	165	103,13		16	
		5	150	93,8		5,5	

\*промах

# ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ

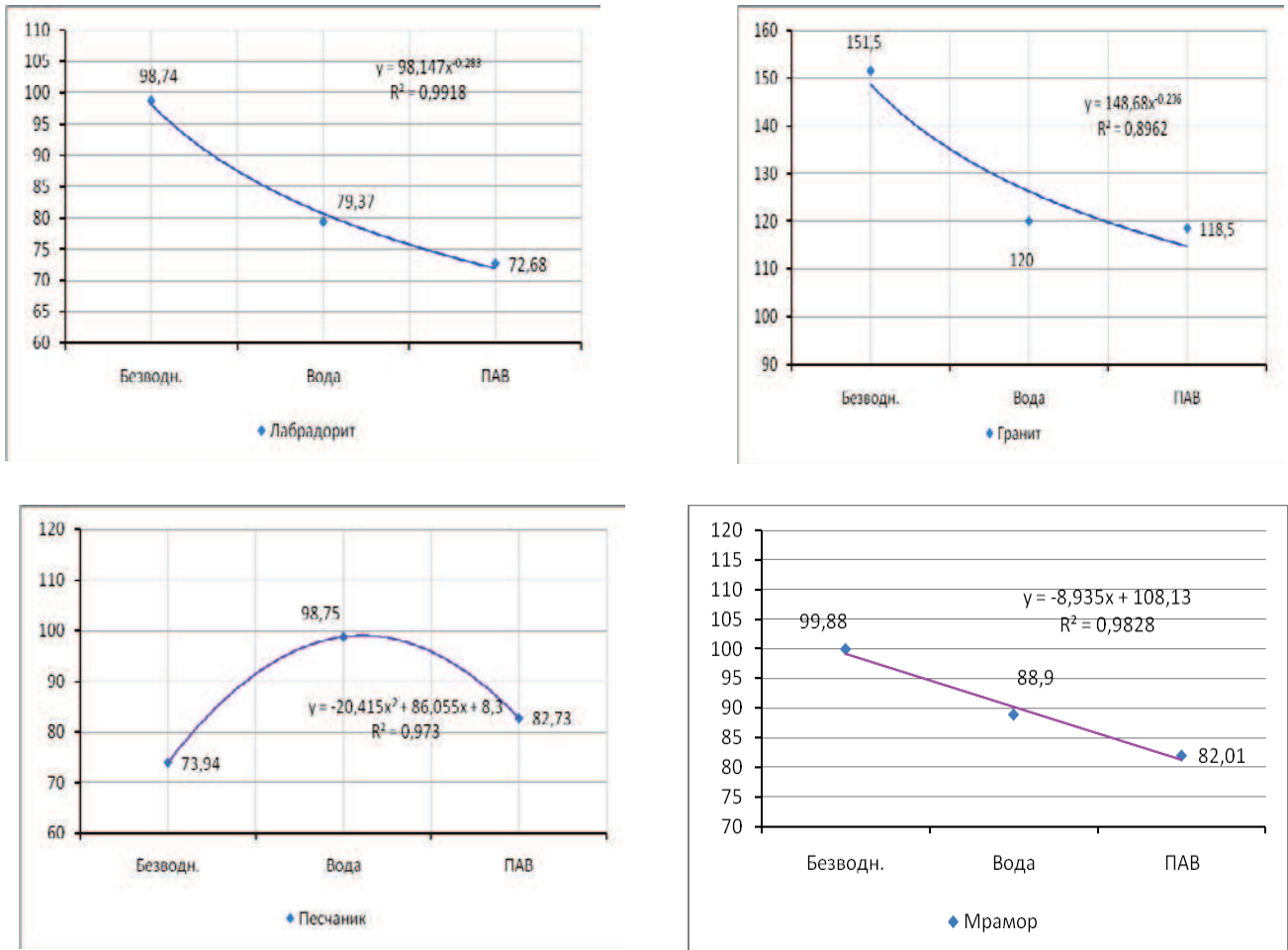


Рисунок 1 – Изменение среднего предела прочности различных типов горных пород в зависимости от условий внешней обработки

Полученные данные свидетельствуют о том, что изменение прочностных свойств протекает однотипно для лабрадорита и гранита и подчиняется степенной зависимости типа  $y = a \cdot e^{-bx}$  с высокой степенью аппроксимации (рис. 1). В мраморе эти изменения происходят равномерно по линейной зависимости. Песчаник выпадает из общей картины, поскольку наличие в нем химических связей типа  $\dots-O-Si-(O-Si-O)_n-O\dots$  способствует образованию межмолекулярных связей между атомами кремния и водорода воды, кислорода и водорода воды, кислородом и атомами кремния зерен породы.

Таким образом, действие ПАВ на изменение прочностных характеристик горной породы зависит от типа самой породы и от ее физико-механических свойств. Так, например, гранит является упруго-хрупкой породой, в то время как песчаник и мрамор – пластично-хрупкие. Насыщение пород активными растворами определяется величиной и характером пористости пород (по полученным данным наиболее существенные изменения прочности, 36%, происходят в песчанике, который имеет высокую пористость).

В третьей серии экспериментов изучали изменение прочностных характеристик горных пород под воздействием ПАВ и воды, заполняющих шпур, просверленные в образцах.

**ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ  
РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ**

В этой серии экспериментов в шпуры заливали воду и раствор поверхностно-активного вещества (состав: анионоактивные ПАВ 15–30 %, неионогенные ПАВ <5 %) с водой (1:6 – данная концентрация установлена ранее как наиболее оптимальная) и выдерживали в течение одного часа, после чего образцы нагружали вдоль оси шпура статической нагрузкой до разрушения, определяя их предел прочности. Результаты экспериментов приведены в табл. 3.

Таблица 3 – Изменение предела прочности горных пород при статическом нагружении при наличии ПАВ и воды в зоне разрушения

Порода	Жидкость	Образцы	Предельная нагрузка при одноосном сжатии, кН	Предел прочности при одноосном сжатии, МПа	Среднее значение предела прочности при одноосном сжатии, МПа	Отклонение предела прочности образцов от среднего значения, %	Уточненный предел прочности, МПа
1	2	3	4	5	6	7	8
Лабрадорит	ПАВ	1	142	88,8	83,8	11	83,8
		2	125	78,1		9,6	
		3	134	83,8		0	
		4	133	83,3		0,6	
		5	136	85		1,4	
	Вода	1	116	72,5	72,8	0,4	72,8
		2	110	68,75		5,6	
		3	130	81,25		11,6	
		4	110	68,75		5,6	
		5	116	72,5		0,4	
Гранит	ПАВ	1	103	64,38	77,38	16	71,72
		2	126	78,75		1,8	
		3	150	100		29*	
		4	120	75		3	
		5	110	68,75		11,2	
	Вода	1	172	107,5	96,62	11	96,62
		2	132	82,5		14	
		3	150	100		3,5	
		4	157	98,12		1,2	
		5	152	95		1,7	
Песчаник	ПАВ	1	129	80,5	77,7	3,6	77,7
		2	118	73,75		5	
		3	131	81,88		5,4	
		4	132	82,37		6	
		5	112	70		10	
	Вода	1	118	73,75	82,3	10,3	82,3
		2	146	91,25		10	
		3	131	81,88		0,1	
		4	128	80,02		2,8	
		5	135	84,6		3	

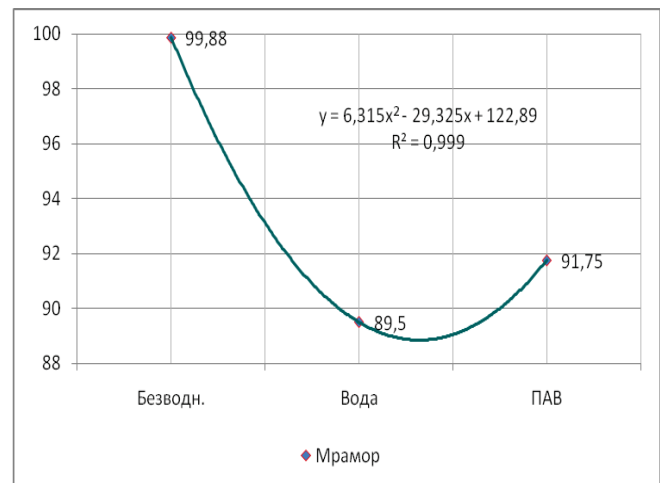
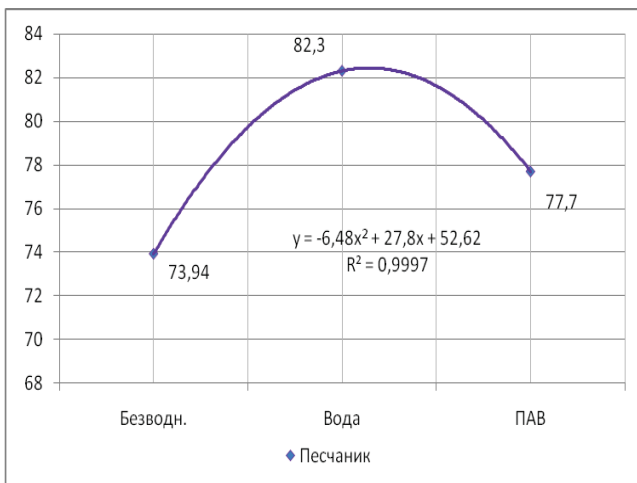
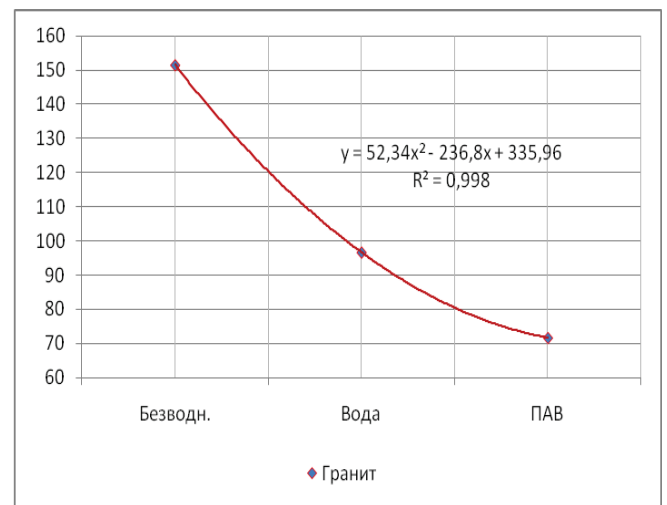
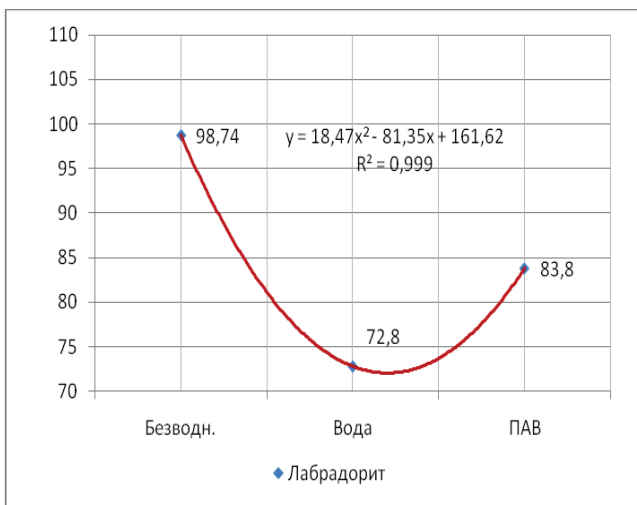


# ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ

Продолжение табл. 3

1	2	3	4	5	6	7	8
Мрамор	ПАВ	1	174	108,75	91,75	18,5	91,75
		2	130	81,25		11,4	
		3	122	76,25		16,9	
		4	136	85		7,3	
		5	172	107,5		17,1	
	Вода	1	158	98,75	89,49	10	89,49
		2	137	85,6		4,3	
		3	137	85,6		4,3	
		4	154	96,25		7,6	
		5	130	81,25		9,2	

\* промах



**Рисунок 2 – Изменение предела прочности горных пород при статическом нагружении при наличии раствора ПАВ и воды в шпурах**

Результаты исследований, представленные в табл. 3 и на рис. 2, отличаются от данных табл. 1 и рис.1 и позволяют выдвинуть следующую гипотезу:

## ТЕОРЕТИЧНІ Й ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ РУЙНУВАННЯ ГІРСЬКИХ ПОРІД ВИБУХОМ

---

– для песчаника – при воздействии на породу внутри шпуров воды последняя выполняет роль «блокирующего моста – перемычки» в ближней зоне вследствие собственной динамической вязкости, упругости и текучести, что способствует увеличению среднего предела прочности по сравнению с необработанной горной породой для песчаника;

– для лабрадорита, гранита и мрамора частично в ближней зоне может происходить химическое взаимодействие – гидролиз (1)–(3) – с ионами магния, кальция, карбонат-ионами, что приводит к образованию на поверхности породы микрослоя других химических соединений типа  $Mg(OH)_2$ ,  $Ca(OH)_2$  и т.п., меняющих характер прочностных свойств в ближней зоне. Это становится причиной уменьшения жесткости межатомных и межмолекулярных ребер кристаллографической структуры породы. Вследствие всех вышеупомянутых причин при использовании воды как поверхностно-активного вещества предел прочности породы в итоге снижается.



При действии поверхностно-активных веществ, содержащих в своем составе органические соединения с ионоактивными группами типа  $-OH$ ,  $-SO_3H$ ,  $-OSO_2H$ ,  $-OPO_2H$  и т.п. наблюдается явление, названное нами «эффект склеивания» вследствие растекания по поверхности микро- и макротрещин и самого шпура как макроповерхности, что не дает возможности микро- и макротрещинам ни раскрываться, ни смыкаться. Показатели динамической вязкости растворов органических ПАВ и их текучести ниже, чем у воды, что и обеспечивает как бы сшивание трещин. Вследствие этого предел прочности возрастает.

**ВЫВОДЫ.** Таким образом экспериментально подтверждается эффект адсорбционного облегчения деформаций или адсорбционного понижения прочности, обусловленного тем, что адсорбирующиеся вещества (ПАВ), проникая в устья микротрещин в поверхностных слоях деформируемого тела, облегчают их развитие [6].

Система дефектов даже в наиболее хорошо образованных кристаллах создаёт зародыши, на которых, начиная с самых малых деформаций, развиваются микротрещины. Их вероятнейшие размеры, а, следовательно, и размеры в устьях, непрерывно увеличиваются с возрастанием деформации, вместе с тем растёт и величина адсорбционного эффекта. Поверхностно-активные вещества, содержащиеся в среде, окружающей деформируемое тело, адсорбируясь на его внешней поверхности и проникая в устья микротрещин, должны облегчать их развитие до активных размеров и этим способствовать образованию пластических сдвигов.



ЛИТЕРАТУРА

1. Долударева Я.М., Лемижанська В.Д., Козловська Т.Ф., Комир А.І. Влияние поверхностно-активных веществ в зоне разрушения горных пород на интенсивность их дробления при воздействии импульсных нагрузок // Науковий вісник Національного гірничого університету. – 2012. – № 4(130). – С. 93–97.
2. Надь А. Разупрочнение горных пород с помощью развития в них микротрещин при использовании ПАВ и электроразрядных технологий: Рефераты AGH University of Science and Technology (Польша) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [http://www.profuturo.agh.edu.pl/pliki/Referaty\\_VI\\_KKMU/NI/P\\_42\\_AGH-VI\\_KKMU.pdf](http://www.profuturo.agh.edu.pl/pliki/Referaty_VI_KKMU/NI/P_42_AGH-VI_KKMU.pdf)
3. Brożek M., Oruba-Brożek E.: Zależność wytrzymałości na rozciąganie ziaren wapienia i porfiru od rodzaju mikroszczelin. Inżynieria mineralna z. spec. nr 3 s. 200–207. Kraków, 2003
4. Brożek M., Oruba-Brożek E.: Wpływ struktury ziaren mineralnych na ich właściwości wytrzymałościowe na przykładzie wapienia i porfiru. Gospodarka Surowcami Mineralnymi. t. 19 z. 3 s. 91–109, 2003.
5. Протасов Ю.И., Теоретические основы механического разрушения горных пород. Москва, Недра 1985.
6. Ребиндер П.А. Взаимосвязь поверхностных и объемных свойств растворов поверхностно-активных веществ // Успехи коллоидной химии. – М.: Наука, 1973.–С. 9–68.

**SURFACTANTS AS DESTABILIZERS OF ELASTOPLASTIC PROPERTIES  
OF ROCKS**

**Ya. Doludareva, V. Kulynych, T. Kozlovska, V. Doludarev**

Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University

vul. Pershotravneva, 20, Kremenchuk, 39600, Ukraine. E-mail: [tehm@kdu.edu.ua](mailto:tehm@kdu.edu.ua)

It is investigated the influence of water as a surfactant and aqueous solutions of surfactants for changes in the strength properties of rocks of different geomorphological nature. It is shown that the effect of surfactants on the rocks over its entire surfaces and only on a surface within the boreholes differs in character from the physico-chemical point of view, that is displayed in changing of the physico-mechanical properties, in particular strength, of studied rocks: labradorite, granite, sandstone, marble.

**Key words:** rocks, surfactants, mechanochemical characteristics elasto-plastic properties.

REFERENCES

1. Doludareva, Ya.S., Lemizhanska, V.D., Kozlovska, T.F., (2013) “The influence of surface-active substances in the region of rock destruction on the intensity of their fragmentation under the action of pulsed loads”, *Naukovij visnyk Natsionalnogo girnychogo universytetu imeni Mykhaila Ostrohradskogo*, vol. 4, no. 130, pp. 93–97.
2. Nad, A. “Development and prospects of mineral liberation by using SAW and electrical pulses”, *Referats of AGH University of Science and Technology (Poland)*. – Режим доступа: [http://www.profuturo.agh.edu.pl/pliki/Referaty\\_VI\\_KKMU/NI/P\\_42\\_AGH-VI\\_KKMU.pdf](http://www.profuturo.agh.edu.pl/pliki/Referaty_VI_KKMU/NI/P_42_AGH-VI_KKMU.pdf)

3. Brożek M., Oruba-Brożek E.: Zależność wytrzymałości na rozciąganie ziaren wapienia i porfiru od rodzaju mikroszczelin. Inżynieria mineralna z. spec. nr 3 s. 200–207. Kraków, 2003.

4. Brożek M., Oruba-Brożek E.: Wpływ struktury ziaren mineralnych na ich właściwości wytrzymałościowe na przykładzie wapienia i porfiru. Gospodarka Surowcami Mineralnymi. t. 19 z. 3 s. 91–109, 2003.

5. Protasov, Yu. I. (1985) *Teoretycheskie osnovy mehanicheskogo razrusheniya gornyh porod* [Theoretical foundations of mechanical destruction of rocks], Nedra, Moscow, Russia.

6. Rebinder, P.A., (1973), *Vzaimosvjaz poverhnostnyh i objemnyh svojstv rastvorov povernostno-aktyvnyh veshestv // Uspehi kolloidnoj himii* [Interconnection surface and volume properties of solutions of surfactants // Advances of colloid chemistry], Nedra, Moscow, Russia.

Стаття надійшла 04.10.2013.

УДК 622.236.4.001.1

### **НЕКОТОРЫЕ АСПЕКТЫ ФИЗИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ В ПОРОДНОМ МАССИВЕ, ВОЗНИКАЮЩИХ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ УДАРНЫХ ВОЛН**

**В. П. Куринной, И. П. Гаркуша**

ГВУЗ «Национальный горный университет»

просп. К. Маркса, 19, г. Днепропетровск, 49027, Украина.

E – mail: nmu@nmu.org.ua

Рассмотрены некоторые аспекты физических процессов, протекающих в массиве горных пород при распространении в них ударных волн. Выполнена оценка минимальных размеров частиц, на которые разрушается порода в том случае, когда при взрыве не возникает ударная волна, а продукты взрыва возбуждают в породе волну сжатия. Определена величина зоны измельчения породы вокруг скважинного заряда взрывчатого вещества. Показано, что в зоне измельчения большие потери энергии идут на нагревание породы. Причем, когда скорость детонации меньше скорости волны напряжений в породе, направление максимальных сжимающих напряжений в волне напряжений, обгоняющей волну детонации, совершает поворот на угол больше 90°, что увеличивает диссипативные потери. Кроме того, получено выражение, позволяющее оценить давление, необходимое для образования ударной волны в газе.

**Ключевые слова:** ударная волна, взрывчатое вещество, скважинные заряды.

### **ДЕЯКІ АСПЕКТИ ФІЗИЧНИХ ПРОЦЕСІВ У ПОРОДНОМУ МАСИВІ, ЩО ВІНИКАЮТЬ ПРИ РОЗПОВСЮДЖЕННІ УДАРНИХ ХВИЛЬ**

**В. П. Куринний, І. П. Гаркуша.**

ДВНЗ «Національний гірничий університет» України

просп. К. Маркса, 19, м. Дніпропетровськ, 49027, Україна.

E – mail: nmu@nmu.org.ua