

**СПОСОБИ ВИБУХОВОГО РУЙНУВАННЯ,
ЩО ЗАБЕЗПЕЧУЮТЬ РІЗНОГРАДІЄНТНЕ НАВАНТАЖЕННЯ
МАСИВУ ГІРСЬКИХ ПОРІД**

Е. І. Єфремов, І. Л. Кратковський, В. О. Никифорова

Інститут геотехнічної механіки ім. М.С. Полякова НАН України

вул. Сімферопольська, 2а, м. Дніпро, 49005, Україна.

E-mail: kratkovsky@i.ua

Розглянуто способи вибухової відбійки, при яких зростає роль розтягувальних і зсувних сил в руйнуванні гірських порід. Це можна реалізувати під час вибуху неоднорідних за енергетикою подовжених зарядів вибухових речовин (ВР), зокрема, зарядів змінного по їх довжині діаметра із звуженими і розширеними ділянками. Тиск на поверхню зарядної порожнини на звужених ділянках у 3-5 разів нижче, ніж при безпосередньому контакті вибухової речовини з поверхнею зарядної порожнини, що забезпечує різноградієнтне навантаження масиву гірських порід. Проведені експериментальні дослідження в полігонних і промислових умовах показали, що неоднорідне вибухове навантаження по довжині заряду і в об'ємі середовища дозволяє підвищити якість дроблення і знизити об'єм дрібних фракцій.

Ключові слова: вибухове дроблення, подовжений заряд, змінний діаметр, різноградієнтне навантаження.

**СПОСОБЫ ВЗРЫВНОГО РАЗРУШЕНИЯ,
ОБЕСПЕЧИВАЮЩИЕ РАЗНОГРАДИЕНТНОЕ НАГРУЖЕНИЕ
ПОРОДНОГО МАССИВА**

Э. И. Ефремов, И. Л. Кратковский, В. А. Никифорова

Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины

ул. Симферопольская, 2а, г. Днепр, 49005, Украина.

E-mail: kratkovsky@i.ua

Рассмотрены способы взрывной отбойки, при которых возрастает роль растягивающих и сдвиговых сил в разрушении горных пород. Это можно реализовать при взрыве неоднородных по энергетике удлиненных зарядов взрывчатых веществ (ВВ), в частности, зарядов переменного по их длине диаметра с зауженными и расширенными участками. Давление на стенки зарядной полости на зауженных участках в 3-5 раз ниже, чем при непосредственном контакте ВВ со стенками зарядной полости, что обеспечивает неоднородное нагружение массива горных пород. Проведенные экспериментальные исследования в полигонных (на моделях) и промышленных условиях (в полиэтиленовых оболочках переменного сечения) показали, что разноградиентное взрывное нагружение по длине заряда в объеме среды позволяет повысить качество взрывного дробления и снизить объем мелких фракций.

Ключевые слова: взрывное дробление, удлиненный заряд, переменный диаметр, разноградиентное нагружение.

АКТУАЛЬНІСТЬ РОБОТИ. Вибухова відбійка міцних гірських порід є досить відповідальною і дорогою операцією при видобутку корисних копалин. Незважаючи на певні успіхи в розвитку невибухових способів руйнування гірських порід в промислових масштабах в доступній для огляду перспективі альтернативи вибуховому способу немає [1]. Тому розробка нових способів вибухової відбійки і підвищення ефективності існуючих способів представляються актуальними.

Метою дослідження є розробка способів вибухового руйнування, що забезпечують різноградієнтне навантаження масиву гірських порід.

МАТЕРІАЛ І РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ. Підвищення ефективності відбійки міцних гірських порід вибухом свердловинних зарядів ВР можливо при використанні конструкцій зарядів, що забезпечують різноградієнтне навантаження під час вибуху. До них відносяться комбіновані заряди з чергуються ВР різної потужності, заряди, розосереджені повітряними і водними проміжками, а також проміжками з сипучих і низькощільних матеріалів [2].

Створення неоднорідних полів напружень і забезпечення різноградієнтного навантаження масиву гірських порід особливо важливо при розробці різноміцних масивів з використанням енергії вибуху [3–5]. Способом підвищення інтенсивності вибухового дроблення є збільшення маси ВР в шарі міцної породи за рахунок розширення свердловин в зонах їх перетинання з твердими включеннями, або розміщення більш потужного ВР в шарі міцної породи.

Одним із способів створення різноградієнтного вибухового навантаження твердих середовищ є формування в циліндричних зарядних порожнинах зарядів змінного перерізу за допомогою спеціальних оболонок для розміщення ВР [6, 7].

При формуванні зарядів змінного діаметру в циліндричних зарядних порожнинах на їх розширених ділянках вибухова речовина прилягає до поверхні зарядної порожнини, маючи контакт із середовищем, що руйнується. На звужених ділянках зарядів між вибуховою речовиною і поверхнею зарядної порожнини утворюються інертні зазори (повітряні, водні).

Теоретична оцінка тиску продуктів детонації вибухових речовин на розширених і звужених ділянках показала, що тиск на звужених ділянках в 3–5 разів нижче, ніж при безпосередньому контакті вибухових речовин з поверхнею вибуховий порожнини.

Заряди змінного діаметру забезпечують різноградієнтне навантаження твердих середовищ і виникнення зсувних зусиль, руйнуюча дія яких менш енергоємна, ніж руйнування стискаючими навантаженнями [8].

Знаючи тиск на поверхню зарядної порожнини на розширених (P_1) і звужених (P_2) ділянках заряду, можна оцінити розмір куса зруйнованого вибухом середовища $a(r)$ на відстані r від осі заряду

$$a(r) = \frac{\sigma_c}{P_1 - P_2} \left(\frac{r}{r_0} \right)^n h_y,$$

де σ_c – динамічний межа міцності середовища на зрушення; h_y – довжина звуженого ділянки зарядної порожнини; n – коефіцієнт загасання напружень середовища з відстанню.

Чим більше різниця тисків на розширених і звужених ділянках, тим інтенсивніше відбувається руйнування середовища.

Експериментальні дослідження руйнівної дії зарядів змінного діаметру, що забезпечують різноградієнтне руйнування середовища, були проведені в умовах полігону підприємства ПрАТ «Промвибух» на піщано-цементних моделях [9].

Моделі мали форму паралелепіпедів розмірами 200×300×300 мм, в яких створювали по дві циліндричні порожнини діаметром 16 мм і довжиною 140 мм. В циліндричних порожнинах за допомогою паперових гільз змінного перерізу формувалися заряди амоніту № 6ЖВ змінного діаметру по їх довжині. Довжина колонки заряду становила 70 мм. В якості набійки використовували пісок. Зміна умов навантаження матеріалу моделей під час вибуху зарядів змінного перерізу досягалось шляхом розташування розширених і звужених ділянок подовжених зарядів в суміжних порожнинах один проти одного (опозитне розташування) і в шаховому порядку.

Маса ВР в кожному заряді становила 8,6 г. Сумарна маса ВР в моделях - 17,2 г, а питома витрата - 1,43 кг/м³. Ініціювання зарядів здійснювалося детонуючим шнуром ДШЕ-9.

Гранулометричний склад зруйнованих вибухом моделей досліджувався методом ситового аналізу. Обробка гранулометричного складу показала, що характер вибухового дроблення залежить від розташування розширених і звужених ділянок в суміжних зарядних порожнинах.

При їх розташуванні в шаховому порядку спостерігається зменшення виходу великих фракцій (3-8 см) і, відповідно, діаметра середнього куска, в порівнянні з опозитним розташуванням розширених і звужених ділянок, однак вихід дрібних фракцій (0-0,1 см) при цьому збільшується.

Таким чином, результати полігонних експериментів підтвердили отриманий теоретичним шляхом висновок про те, що створення неоднорідного вибухового навантаження в об'ємі твердого середовища і по довжині зарядів сприяє поліпшенню якості її вибухового дроблення.

На практиці формування подовжених зарядів змінного по їх довжині діаметра досягається при використанні поліетиленових оболонок з звуженнями і розширеннями, які чергуються між собою. Ефективність розглянутих конструкцій свердловинних зарядів ВР була підтверджена в промислових умовах [10]. При цьому область їх раціонального застосування з позиції якості дроблення порід і економії ВР необхідно розглядати з урахуванням типу корисних копалин. Якщо при розробці залізрудних родовищ фактор переподрібнення порід (дрібні фракції) під час вибуху є позитивним (знижуються витрати в процесі збагачення руд), то при вибуховому дробленні нерудної сировини (граніти, флюсові вапняки і доломіт) переподрібнена порода – відноситься до втрат корисних копалин.

ВИСНОВКИ. Конструкції зарядів, що дозволяють змінювати концентрацію енергії в зарядній порожнині по її довжині, забезпечують різноградієнтне наван-

таження породного масиву, при цьому в його руйнуванні зростає роль розтягувальних і зсувних напружень.

При розташуванні звужених і розширених ділянок в суміжних циліндричних зарядних порожнинах в шаховому порядку, в порівнянні з опозитним (один проти одного) їх розташуванням, якість дроблення твердого середовища поліпшується.

ЛІТЕРАТУРА

1. Закалинский В. М. Перспективные взрывные технологии. *ГИАБ*. 2012. № 2. С. 301–307.
2. Курінний В. П. Фізичні аспекти руйнування гірських порід вибухом. Дніпро: Нац.гірн. ун-т, 2009. 158 с.
3. Взрывное разрушение горных пород разнопрочных массивов / А. В. Дугарцыренов, С. И. Ким, К. И. Дожигов [и др.]. *ГИАБ*. 2012. № 11. С. 373–376.
4. Рахманов Р. А. Обоснование параметров комбинированной конструкции скважинного заряда для разнопрочного горного массива. *ГИАБ*. 2013. № 8. С. 207–209.
5. Гирич И. Б. Повышение эффективности взрывных работ на карьерах со сложной геологической структурой. *ГИАБ*. 2013. № 5. С. 306–308.
6. Патент на корисну модель № 6518, Україна, 2005. МКВ⁷ F42D 3/04, E21C 37/00. Спосіб формування свердловинного заряду вибуховими речовинами / Е. І. Єфремов, А. В. Пономарьов, В. В. Баранник [і інші]; заявник і власник патенту ВАТ «ДФДК», 2004097557; замовлено 16.09.2004; надруковано 16.05.2015. Бюл. № 5.
7. Разрушение твердых сред при их разноградиентном взрывном нагружении удлиненными зарядами переменного диаметра / Э. И. Ефремов, В. А. Никифорова, И. Л. Кратковский [и др.]. *Збірник наукових праць Національного гірничого університету*. Дніпро, 2018. № 54. С. 52–59.
8. Гончаров С. А., Клюка О. Ф., Чурилов Н. Г. Стратегия ресурсосбережения при разрушении горных пород. *Горн. журн.* 2003. № 5. С. 26–30.
9. Повышение эффективности разрушения горных пород при взрыве удлиненных зарядов переменного диаметра / Э. И. Ефремов, В. А. Никифорова, И. Л. Кратковский [и др.]. *УСИБ*, 2018. № 2(34). С. 13–16.
10. Опытнo-промышленные испытания технологии заряжания и эффективности взрывания необводненных горных пород зарядами переменного диаметра / Э. И. Ефремов, М. П. Белоконь, Е. В. Николенко [и др.]. *Межвед. сб. науч. тр. Геотехническая механика*. Днепропетровск, 2005. Вып. 58. С. 13–18.

BLASTED BREAKING METHODS PROVIDING MULTI-GRADIENT ROCK MASSIF LOADING

E. Yefremov, I. Kratkovskyi, V. Nykyforova

Institute of Geotechnical Mechanics named by M.S. Poljakov
of National Academy of Sciences of Ukraine

vul. Simferopolska, 2a, Dnipro, 49005, Ukraine. E-mail: kratkovskyi@i.ua

Purpose. To analyze the blasting methods, providing due to multi-gradient loading the reduction energy intensity of rock. **Methodology.** The theoretical consideration of explosive destruction processes based on methods of solid media mechanics and explosion physics in experimental researches modeling method and method of sieve analysis were conducted was applied. The methods of blasting, in which the role of tensile and shear forces in the rock destruction is increasing were reviewed. This can be realized in case of explosion heterogeneous on energy of elongated charges, in particular, of variable diameter along its lengths with narrowed and widened areas. The pressure on the surface of the charging cavity in the narrowed sections is 3-5 times lower than in area with the direct contact of the explosive with the surface of the charging cavity. It provides multi-gradient loading of the rock massif. Experimental studies in polygon and industrial conditions have shown that inhomogeneous explosive loading along the length of the charge and in the volume of the rock mass can improve the quality of explosive crushing and reduce the quantity of fines. **Results.** Creating a multi-gradient explosive load on hard media is achieved by the formation in the cylindrical charge cavities of alternating cross section charges with the help of special shells for placing explosives. In alternating-diameter charges formed at their expanded sites, the explosive is adjacent to the surface of the charge cavity, having contact with the destructive medium. Inert areas (air, water) are formed in the narrowed areas of the charge between the explosive and the surface of the charge cavity. The theoretical estimation the pressure of detonation products in the expanded and narrowed areas showed that the pressure on the narrowed areas is 3-5 times lower than that of the direct contact of explosives with the surface of the explosive cavity. **Originality.** Substantiation of explosive detonation methods that create a multi-gradient load of rocks during the explosion of no uniform energy explosive charges and increase the role of less energy-consuming tensile and shear forces in their destruction. **Practical value.** The results of the work allowed justifying substantiating the efficiency of rock explosive destruction methods in case of explosion the elongated charges of variable diameter. **Conclusions.** Charge designs, which allow changing the concentration of energy in the charge cavity along its length, provide differently gradient loading of the rock mass, with the role of tensile and shear stresses increasing in its destruction. When the location of the narrowed and expanded areas in adjacent cylindrical charging cavities in a staggered manner, compared to the opposite (against each other) their location, the quality of crushing of the solid medium improves.

Key words: explosive crushing elongated charge, variable diameter, multi-gradient loading.

REFERENCES

1. Zakalinsky, V. M. (2012), "Advanced Explosive Technologies", *GIAB*. No. 2, pp. 301–307.
2. Kurinnyi, V. P. (2009), *Fizichni aspekti rujnuvannya girskih porid vibuhom* [Physical aspects of rock blasting destruction], Dnipro, National Mining University, Ukraine.
3. Dugartsyrenov, A. V., Kim, S. I., Dozhikov, K. I. [et al.] (2012), "Explosive de-

struction of diverse strengths rocks", *GIAB*. No. 11, pp. 373–376.

4. Rakhmanov, R. A. (2013), "The parameters reason of borehole combined charge design for a diverse strengths massif", *GIAB*. No. 8, pp. 207–209.

5. Girich, I. B. (2013), "Improving the efficiency of blasting in quarries with a complex geological structure", *GIAB*. No. 5, pp. 306–308.

6. Patent No. 6518, Ukraine, F42D 3/04, E21C 37/00. Method for formulating a borehole charge with explosives / E. I. Efremov, A. V. Ponomaryov, V. V. Barannik [et al.]; Applicant and owner of the patent – J.-SC "Dokuchaevsk Flux-Dolomite Company", Claim.

No. 2004097557; dated 16.09.2004; Printed 05.16.2015. – Bul. No. 5.

7. Efremov, E. I., Nikiforova, V. A., Kratkovsky, I. L. [et al.] (2018), "The destruction of solid media during their diverse explosive loading with elongated charges of variable diameter", *Collection of scientific. Proceedings of the National Mining University*. No. 54. Dnipro, pp. 52–59.

8. Goncharov, S. A., Kluka, O. F., Churilov, N. G. (2003), "The strategy of resource conservation in the destruction of rocks", *Gorn. zhurn.* No. 5, pp. 26–30.

9. Efremov, E. I., Nikiforova, V. A., Kratkovsky, I. L. [et al.] (2018), "Improving the efficiency of rock destruction during the explosion of elongated charges of variable diameter", *USIV*. No. 2 (34), pp. 13–16.

10. Efremov, E. I., Belokon, M. P., Nikolenko, E. V. [et al.] (2005), "Pilot tests of charging technology and blasting efficiency of non-irrigated rocks with charges of variable diameter", *Interdepartmental collection of scientific papers. Geotechnical mechanics*. Dnepropetrovsk, Issue 58, pp. 13–18.

Стаття надійшла 28.11.2019.