



ПРИЛОЖЕНИЕ НА ОБЕМНО-ЕКСПАНДИРАЩИ ХИМИЧЕСКИ КОМПОЗИЦИИ ПРИ ДОБИВА НА СКАЛНО-ОБЛИЦОВЪЧНИ МАТЕРИАЛИ

Петър Шишков¹, Надежда Стойчева²

¹Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

²Минно-геоложки университет „Св. Иван Рилски“, 1700 София

peter.shishkov@mgu.bg ; n.stoycheva@mgu.bg

ABSTRACT

Traditional methods of obtaining dimensioned rock blocks are associated with losses of valuable raw material or with high financial costs to reduce these losses. In the drilling-wedge method, the loss of quality material is small, but the execution is hard and labor-intensive, and the productivity is too poor. It is an indisputable fact that blasting technology over the years has caused unwanted cracking of the cut-off blocks and the base massif, which is a major cause of waste generation and yield reduction. The use of stone cutters for primary block mining minimizes material crushing losses, but costs significant initial investment and ongoing operating costs for consumables, maintenance, service and energy. The technology with volume-expanding chemical compositions can be considered as an evolutionary development of the drilling-wedge method. It is a suitable intermediate solution, which does not damage the rock material like the explosive shock wave, and at the same time does not require serious investment and operating capital investments. Unlike industrial explosives, expanding mixtures do not cause seismic vibrations, flying fragments, shock waves, or emissions of dust and toxic gases. They can be used near protected sites, as well as on deposits without electricity and running water.

Ключови думи: добив, декоративен камък, експандиращи смеси, скално-облицовъчни материали.

Key words: mining, decorative stone, expanding mixtures, rock-facing materials.

За опазване на скъпите декоративно-облицовъчни скални материали от образуване на микропукнатини, при първичното извличане от масива (както и при вторичното цепене на блоковете), взривното въздействие се замества от контролирано процепване с обемно-разширяващи се химични състави. През последните години тази технология намира приложение при добива на мрамор, брекча, гранит и други скали с висока твърдост и добра цепителност. Метода е слабоефективен в меки скали. Концепцията се базира на свойството на определени химични съединения при намокряне да „поглъщат“ водата като я свързват със собствените си молекули в т. нар. хелатни комплекси. При привидното изсъхване на материала водните молекули се оказват част от кристалната решетка на съединението. Това довежда до драстично увеличение на коефициента на обемно разширение. Така, тези вещества при поставянето им в пробитите дупки и контакт с вода са способни след известно време да се втвърдяват и разширяват, като създават напрежения в скалите до 40-45 MPa (Stoycheva, N., et al., 2021).

1. Преглед на чуждестранния опит за добив на скални блокове с помощта на обемно-експандиращи химически реагенти

При провеждането на предварителните проучвания за същността и начина на действие на тези материали бе установено, че изнесената на специализирани форуми и публикувана в научни издания информация е твърде оскъдна. Някои автори описват продуктите за безвзривно отцепване с разнородни названия като „експанзионен прах“, „химически клин“ „експанзивен хоросан“, „неексплозивен разрушителен агент“, „тих взрив“. Представят ги като нетоксични и циментиращи прахове, които се състоят от калцинирани оксиди на калий, силиций и алуминий. Счита се, че някои определени марки са способни да произвеждат изключително мощно експанзивно налягане от 18000



psi (~124 MPa), когато се смесят с вода. Освен за разбиване на различни скални породи, тези материали намират приложение в строителството за разрушаване на бетонни и стоманобетонни елементи посредством бавно и безшумно разцепване.

На база на натрупан опит редица автори споделят особености, негативни прояви и специфични подходи при работа с обемно-разширяващи се състави. Според Bakhtavar, E., et al. (2011) преди изливането на експанзионния разтвор, перфорациите трябва да се изчистят старателно от остатъчния прах от пробиването. След това дупките трябва да бъдат изцяло запълнени със сместа. Експанзивният хоросан упражнява еднакъв натиск във всяка дупка. Накрая скалата се разцепва в посоката на пробитите отвори. Авторите споменават, че пръскането на повърхността на третираната скала с вода след появата на първите пукнатини води до увеличаване на ширината им и до ускоряване на процеса. Z. Rehman et al., (2018) твърдят, че колкото по-ниска е температурата, толкова по-дълго е времето за образуване на пукнатини. Представител на производителя „Булцемекс“ споделя, че при летните горещини химичната реакция на неговия продукт може да се ускори до степен на избухване на задържани газови продукти, което налага модификация на компонентния състав за различни температури на обектите. В тази връзка други производители съветват да се покрият запълнените дупки с пластмасов или друг капак, за да избегнат инциденти, причинени от внезапно издухване на нагорещен прах.

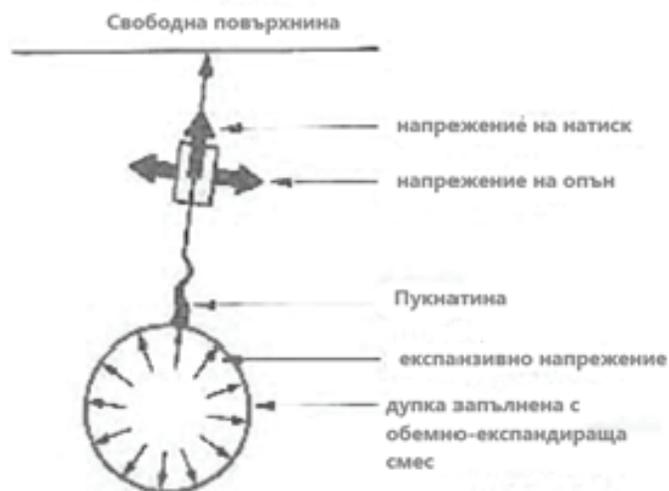
Предвид споменатите особености, повечето производители предлагат химическите експандери в три различни варианта според температурните диапазони за употреба. На пазара се предлагат продукти от различни производители. Принципа на действие и основните ингредиенти са идентични, като разликите са в добавките за ускоряване и стабилизиране на процеса. Специфична особеност е температурния диапазон за ефективна работа на тези състави. Под -5 °C водата замръзва и технологията става неприложима. С повишаване на температурата химичните процеси се ускоряват и работоспособността се увеличава. Според публикуваната от търговците информация за химическия състав на китайски обемно-експандиращи смеси, съдържанието на компонентите може да варира в следните граници според разновидността на продукта за работа в различните температурни диапазони: CaO (60% - 95%), SiO₂ аморфен (5% - 10%), Fe₂O₃ (1% - 5%), Al₂O₃ (1% - 5%)

Наред с множеството предимства, на обемно-разширяващите се агенти, производителите не спестяват и важни инструкции за безопасността при съхранението и употребата им, което е достатъчен сигнал за относително агресивния характер на химичните състави. Въпреки че, този тип материали са опаковани във влагозащитни торби, продължителното им съхранение може да причини влошаване на качеството на съставките им. Според MSDS-листа препаратите трябва да се разопаковат непосредствено преди използването им. Опаковките трябва да се съхраняват плътно затворени на сухо място. По този начин могат да се използват ефективно около една година. В инструкциите на всички продукти съществува предупреждение, че причиняват изгаряния на дихателните пътища, очите и кожата. Препоръчва се използването на лични предпазни средства при работа с тях. Указанията за първа помощ при попадане в очите, по лигавиците и кожата, както и при вдишване и поглъщане са сходни с тези при въздействие на киселини и основи. (Vladkova B. 2020, Kostadinova N., 2020) Същевременно, в раздела за предпазните мерки за околната среда е декларирано, че HE CA ИЗВЕСТНИ значителни ефекти или критични опасности, както и че самият препарат и продуктите от неговото разграждане HE са токсични.

В публикацията (Z. Rehman et al., 2018) е представено детайлно описание на механизма на пукнатинообразуване. След като разрежданият със съответното количество вода обемно-разширяващ реагент се излее в перфорирани отвори, експанзионното напрежение постепенно нараства с времето и след 5 часа при стайна температура достига стойности надвишаващи 50 MPa (равно на 5098,58 t/m²). Докато хидратираният състав генерира своето експанзивно напрежение, материалът който трябва да бъде разцепен претърпява следните необратими деформации: (1) процес на генериране на пукнатини, (2) разпространение на пукнатините, (3) увеличаване на ширината на пукнатините. Очевидно този механизъм на отделяне се отличава от отцепването чрез взривяване.

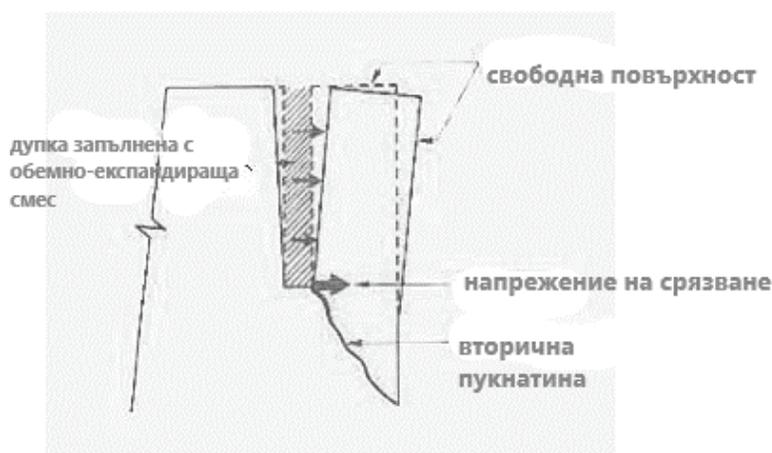


Механизмът на пукнатинообразуване от напрежението при разширяване на обемно-разширяващия се състав е показан на фиг.1. Експанзивното напрежение в запълнената перфорация поражда напрежения на натиск върху твърдата среда (скала, бетон). Пукнатините започват от вътрешната повърхност на отвора. Те са причинени от напрежението на опън, възникнало перпендикулярно на напрежението на натиск. Напрежението на натиск продължава да работи дори след появата на пукнатини, като предизвиква тяхното разширение и разпространение.



Фиг.1. Механизъм на пукнатинообразуване от натисковото напрежение на обемно-експандиращия състав

По време на този процес започват да се образуват и нови пукнатини. Обикновено за един отвор се зараждат и разпространяват от 2 до 4 пукнатини. Когато има открита повърхност, пукнатината, както е показано на фиг.2, се разтваря благодарение на напрежението на срязване. Тогава, от дъното на дупката възниква вторична пукнатина, която се насочва към свободната повърхнина.



Фиг. 2. Механизъм на отбиване на ламела с комбинация от напрежение на натиск и напрежение на срязване

Чуждестранната практика показва, че при първичния добив е желателно дълбочината на дупките да бъде по-голяма като за по-добри резултати се пробиват и хоризонтални дупки без да бъдат запълвани с експандираща смес.



Като обобщение може да се отбележи, че същността на технологията е същата като при пробивно-клиновият и пробивно-взривният метод. Перфорират се вертикални и хоризонтални дупки по контурите на блока с помощта на пробивна механизация (перфоратори, лафети, карети или сонди). Ефективният диапазон при диаметъра на перфорациите е от $\varnothing 32$ до $\varnothing 55$ mm. При по-малки диаметри процента на обемното разширение е недостатъчен да развие разрушителни напрежения. При големи диаметри, разхода за материали става нецелесъобразен на фона на полезния ефект.

Разстоянието между дупките зависи от конкретните условия, вида на добиваните скали и разширителната способност на химичното съединение. Най-често тези разстояния са между 100 mm и 300 mm, а разстоянието до най-близката свободната повърхнина по линията на отцепване е от 400 до 500 mm. Дълбочината на дупките е от $2/3$ до $3/4$ и в много редки случаи равна на съответния параметър (височина или широчина) на блока. Някои производители твърдят, че при увеличаване на дълбочината на отворите, разстоянието между тях може да се уголеми. Колкото по-здрава е скалата, толкова по-малко е отстоянието между перфорациите. Височината на стъпалата при тази технология е сравнително малка до 2.5 m. Когато стъпалата са по-високи отделянето на блоковете става поетапно от полустъпала.

Прахообразното вещество се смесва с 20 до 40 % вода и образувалата се каша се излива в дупките, като е възможна работа дори и при отрицателни температури. Химичните реакции започват веднага. Времето за разрушаване на скалите (разцепването става по линията на пробиване на дупките) варира в границите от 12 часа до 72 часа, като фактори влияещи на това време са: вида на химичното вещество, свойствата на скалите, температурата на околната среда и скалите, разстоянието между дупките. Времето за разцепването на блоковете може да бъде намалено като бъде намалено разстоянието между дупките, но това от своя страна увеличава времето и разходите за пробиването им. Възможно е отделянето и на много големи блокове от масива с обем до 2000 m³. Разрушаващите скалата напрежения образуват зона с микро-пукнатини, непревишаваща по размер диаметъра на дупките (Primavori P, 1999).

Тази технология за добиване на скални блокове се прилага най-често при комбинирани начини за извършване на вертикалните надлъжни разрези, тъй като обемът на пробивните работи намалява с около 30 % в сравнение с пробивно-клиновият и пробивно-взривният метод (Копрев И., 2016).

2. Експериментални изследвания за добив на риолит с помощта на обемно-разширяващи се химични състави



Фиг. 3. Добив на риолит чрез експандиращи смеси

Поради високата твърдост и добрата цепителност на риолита на кариера „Казаните 1“, бяха проведени серия от експерименти за добив и по-нататъшно разделяне на ламелите в блокове с подходящи размери за натоварването им с наличната механизация (фиг. 3.).

Бяха направени три опита (фиг. 4: а) б) в)). За всеки отделен експеримент бяха използвани незатиснати скални образци с подобни размери. Избраните повърхности на цепене бяха с дължина



около 1.5 m при дебелина на камъка около 1.0 m. Така постигнахме почти еднакви размери на отрезните площи по 1.5 m². Технологията използва същите предварително пробити отвори в скалата както при метода на взривните дупки. Във всеки от трите камъка бяха пробити в една линия успоредни вертикални дупки с дължина 0.8 m и диаметър $\varphi = 38 \div 42$ mm. Разстоянието от планираната равнина на отцепване до челната открита повърхност бе 0.7 m.

За Тест – 1 бяха перфорирани 5 отвора през 0.2 m с отстояние на периферните дупки до страните 0.25 m.

За Тест – 2 бяха перфорирани 4 отвора през 0.3 m с отстояние на периферните дупки до страните 0.30 m.

За Тест – 3 бяха перфорирани 3 отвора през 0.4 m с отстояние на периферните дупки до страните 0.35 m.



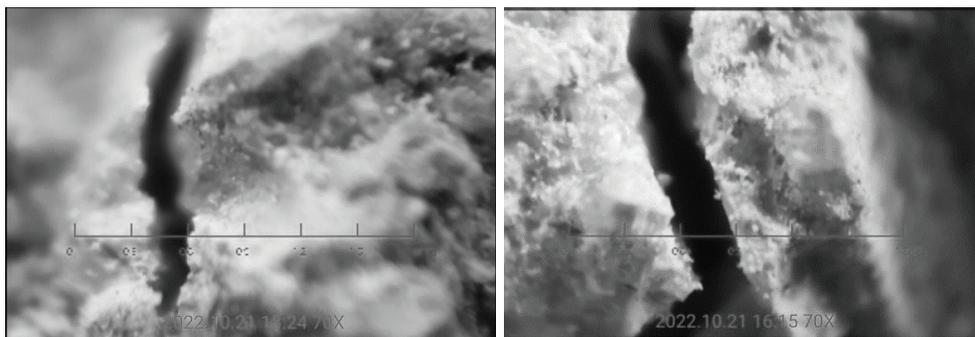
Фиг. 4. Разцепване на скален блок чрез експандиращи химични смеси на кариера „Казаните 1“; а) Тест 1; б) Тест 2; в) Тест 3

За експериментите бе избрана експандираща смес SplitStar със състав по данни на производителя: калциев оксид (60-95 %), аморфен силиций (5-10 %), алуминий (1-5 %) и желязо (1-5 %). Продуктът се предлага в три различни варианта според температурните диапазони за употреба. При провеждането на експериментите температурата на кариерата бе 25 °C с тенденция да нараства



до 30 °C. Поради тази причина бе използвана експандираща смес SCA-1 за работа при най-високи температури. Съставът бе разопакован и хомогенизиран със студена вода на самия обект, непосредствено преди употребата му. Съотношението варира от 280 до 320 ml вода на 1 kg суха смес. Готовия разтвор бе налят експедитивно директно в почистените от прах сухи дупки. Опитните скални образци бяха оставени на въздействието на химическия експандер в продължение на предписаните от доставчика 24 часа, като бяха подложени на периодично наблюдение за регистриране на настъпващи промени (фиг. 5).

Средната пазарна цена на 1 kg от използвания химичен експандиращ състав е около 1.75 EUR. Средния разход при запълване на 1 m отвор с диаметър \varnothing 40 mm е около 1.5 kg сухо вещество под формата на воден разтвор. Може да се приеме, че стойността на изразходвания химически експандер за един линеен метър перфорация (\varnothing 40 mm) е около 2.63 EUR.



Фиг. 5. Нарастване на пукнатина в рамките на 3 часа, предизвикана от обемно-експандиращи смеси

3. Резултати от експериментите

При отцепването с обемноразширяващ се състав на Тест - 1 се забеляза пропукване по линията между залятите отвори още на шестия час след запълването им с разтвора. До 12-тия час пукнатината бе достигнала широчина 10 – 12 mm. До 24-тия час се бе образувала цепнатина с ширина 28 – 30 mm и без изкривяване. Стойността на изразходените материали без да се включват разходите за пробивни работи е 10.50 EUR за 1.5 m² отрезна площ (за запълване на 5 отвора по 0.8 m = 4.0 m x 1.5 kg/m сух реагент = 6.0 kg x 1.75 EUR/kg = 10.5 EUR).

При отцепването с обемноразширяващ се състав на Тест - 2 се забеляза пропукване по линията между залятите отвори около 10-тия час след запълването им с разтвора. До 16-тия час пукнатината бе достигнала широчина 13 – 15 mm. До 24-тия час се бе образувала цепнатина с широчина 24 – 26 mm и с изкривяване заради наличието на естествена нарушеност (дамар). Стойността на изразходените материали без да се включват разходите за пробивни работи е 8.40 EUR за 1.5 m² отрезна площ (за запълване на 4 отвора по 0.8 m = 3.2 m x 1.5 kg/m сух реагент = 4.8 kg x 1.75 EUR/kg = 8.40 EUR).

При отцепването с обемноразширяващ се състав на Тест - 3 първото пропукване по линията между залятите дупки се появи след 12-тия час от запълването им с разтвора. До 20-тия час пукнатината бе достигнала широчина 10 – 11 mm. До 24-тия час се бе образувал процеп с ширина 18 – 19 mm. Стойността на изразходените материали без да се включват разходите за пробивни работи е 6.30 EUR за 1.5 m² отрезна площ (за запълване на 3 отвора по 0.8 m = 2.4 m x 1.5 kg/m сух реагент = 3.6 kg x 1.75 EUR/kg = 6.30 EUR). Предвид постигнатите задоволителни резултати по отцепването без значими щети върху материала, този експеримент се приема за ориентир при изчисляването на средна стойност за получаване на 1 m² отрезна площ с помощта на обемно-разширяващ се химичен реагент. Изчислената цена на 1 m² отрезна площ е: 6.3 EUR : 1.5 m² = 4.20 EUR/m².

Стойността на пробивните работи за отвори с \varnothing 38 ÷ 42 mm възлиза на 20 EUR/m с включени разходи за дизелово гориво и масло, амортизационни отчисления за компресор и пробивно оборудване и заплащане на персонала. В този случай при 3 дупки с дълбочина 0.8 m цената на пробивните работи



за 1.5 m² отрезна площ е: 3 бр. дупки x 0.8 m x 20 EUR/m = 48 EUR. Сумарната средна стойност за 1 m² отрезна площ може да бъде изчислена по следния начин:

$$(48 \text{ EUR} + 6.3 \text{ EUR}) : 1.5 \text{ m}^2 = 36.20 \text{ EUR/m}^2.$$

За отцепването на блок с размери 1.5 m. x 1.0 m. x 0.7 m. (обем 1.05 m³) са необходими пробивни работи с ръчен пневматичен перфоратор 2.40 m : 1.5 m/h. = 1.6 h. Организацията по подготовката на разтвора и зареждането отнема около 0.4 часа. Тоест за добива на 1.05 m³ блок от магмена скала са необходими общо 2 часа, което означава, че средната производителност на работния персонал е 0.53 m³/h. Като се прибави и времето за пукнатинообразуване, тази технология се оказва със сравнително ниска производителност, но в условията на кариери „Казаните 1 и 2“ този средно 24 часов период е приемлив.

За потвърждаване на получените резултати от тест №3 бяха направени поредица от допълнителни експерименти за разцепване на скални образци с отстояние между перфорациите 0.4 m. Опитите бяха проведени при различни температури на околната среда и при скални образци с различна височина и степен на затегнатост в масива. При вторичното разцепване на блоковете дължината на перфорациите бе намалена до 0.6 m. По този начин разходите по пробиване както и количеството на разтвора бяха допълнително редуцирани. В рамките на 8 работни месеца постигнатите резултати бяха повече от задоволителни и това прави предложената оптимизация на разстоянията и на дълбочините на перфорациите приложима за добива на риолит с обемно-експандиращи смеси.

4. Библиография

1. Копрев, И., 2016. *Технология на добива на скално-облицовъчни материали*, издателство Авангард Прима, ISBN 978-619-160-597-2.
2. Bakhtavar, E., Oraee, K., Abdollahisharif, J., (2011). *Determination of practical spacing between holes for the expansive mortars utilization in dimension stone quarries*. In proceedings of SME Annual Meeting, Feb. 27. – Mar. 02. 2011, Denver, CO.
3. Kostadinova N., 2020, *Jet fans efficiency in tunnel emergency situations*, Sustainable Extraction and Processing of Raw Materials (<https://seprm.com>) Volume 1 October Issue 2020, p. 47-52 ISSN 2738-7100 (print), ISSN 2738-7151(online)
4. Primavori P., *Planet stone First edition*, September 1999, Verona, ISBN 88-900067-1-4
5. Rehman, Z., Hussain, S., Mohammad, N., Raza, S., Sherin, S., Khan, M., Tahir, M., Khan, M., (2018). *Comparative analysis of different techniques used for dimension stone mining*, Journal of Himalayan Earth Sciences Volume 51, No. 1, 2018 pp. 23-33.
6. Stoycheva, N., P. Shishkov, (2021). *Comparative analysis of the techniques for detachment of natural stone blocks from the massif with flexible high-explosive charges and bulk-expanding chemical compositions*, Sustainable extraction and processing of raw materials (SEPRM), Vol.2 / 22.Oct. 2021, pp. 63 – 67, Publishing house “St. Ivan Rilski” – Sofia, ISSN 2738-7100, ISSN 2738-7151. (in English)
7. Vladkova B. 2020, *Best Practices to Improve Construction Site Safety*, in the specific conditions of processing plant building“, 9th International Symposium on Occupational Health and Safety – SESAM 2019, October 3rd 2019, Petrosani, Romania, Matec Web of Conferences, Ref. Scopus, Google scholar, January 2020, MATEC Web of Conferences 305:00014, DOI: [10.1051/matecconf/202030500014](https://doi.org/10.1051/matecconf/202030500014)