

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Міністерство освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

КОВТУН АНДРІЙ ІВАНОВИЧ

УДК 622. 231;235

ДИСЕРТАЦІЯ

УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ КЕРОВАНОГО РОЗКОЛУ КАМ'ЯНИХ БЛОКІВ НЕВИБУХОВИМИ РУЙНУЮЧИМИ СУМІЩАМИ

Спеціальність 05.15.03 – відкрита розробка родовищ корисних копалин

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

_____ А.І. Ковтун

Науковий керівник
професор

Кравець Віктор Георгійович, доктор технічних наук,

АНОТАЦІЯ

Ковтун А.І. Удосконалення технології керованого розколу кам'яних блоків невибуховими руйнуючими сумішами. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертації на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.15.03 – відкрита розробка родовищ корисних копалин. – Національний технічний університет України “Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”, МОН України, Київ, 2018.

Дисертацію присвячено розробці наукових основ та обґрунтуванню вдосконаленого методу видобування кам'яних блоків із застосуванням НРС і керуючих пластин – вставок.

Об'єкт дослідження – процеси формування в ощадливому режимі відривної монотріщини в масиві декоративного каменю.

Предмет дослідження – параметри напружено – деформованого стану гірської породи різного ступеня анізотропії навколо шпурів з НРС в присутності агрегату для керованого тріщиноутворення.

Наукова новизна отриманих результатів, що виносяться на захист:

– встановлено методом математичного моделювання, що при використанні НРС в шпурах поширеного діаметра 40 мм з керуючими пластинами – вставками раціональної товщини 5...8 мм досягається випереджуюча концентрація розтягуючих напружень на торцях пластин та зменшення на 20 % максимального некерованого відхилення тріщини відриву від площини шпурів;

– теоретично доведено, що величина некерованого відхилення тріщини відриву від площини шпурів в породному масиві пов'язана залежностями логарифмічного типу з показником анізотропії $\chi = \sigma_{xp}/\sigma_{yp}$, товщиною пластини – вставки h та кутом її орієнтації відносно більшої осі анізотропії β ;

– аналітично доведено, що використання пластини – вставки раціональної товщини забезпечує кероване формування тріщини відриву із збільшенням відстані між шпурами на 25% та зменшенням на 18...20 % витрат НРС.

Практичне значення одержаних результатів:

– розроблено методику визначення технологічних параметрів і способів створення статичних навантажень з допомогою НРС і пластин – вставок на межі контуру шпурового отвору для відділення кам'яних блоків в статичному режимі;

– виходячи з аналізу отриманих теоретичних і експериментальних закономірностей формування зони тріщиноутворення з використанням НРС і пластин – вставок, розроблено підтверджений патентами на винахід комплекс портативного обладнання, що створює тиск до 40 МПа на стінки шпура, достатній для розколу породи;

– розроблено обладнання та технологію його застосування для розколу кам'яних блоків, що дозволяють збільшити відстань між шпурами на величину до 25 % при забезпеченні формування суцільної площини відколу породи, яка успішно випробувана на кар'єрі з видобутку блоків природного каменю;

У вступі обґрунтовано актуальність обраної теми дисертації, дано загальну характеристику роботи, доведено необхідність проведення наукових досліджень. Сформульовано мету і задачі дослідження, вказано на зв'язок роботи з науковими програмами, темами, планами.

У першому розділі проаналізовано існуючі методи та засоби видобування кам'яних блоків, перераховано основні фактори, які впливають на вибір технології видобування блоків.

У другому розділі аналітично досліджено методи керування напрямком тріщиноутворення системою шпурів при відділенні кам'яних блоків з використанням НРС в присутності керуючої пластини – вставки. Для керування напрямком розколу породи в шпурах детально досліджено напружено – деформований стан масиву, який піддається внутрішньому тискові від розширення НРС, розподіленому по двох об'ємах сталеву пластину в отворі шпура, причому цей тиск змінюється залежно від товщини пластини – вставки. З цією метою проаналізовано (НДС) скельного масиву з використанням моделі ізотропного суцільного середовища. Теоретичні дослідження пластини – вставки дозволили отримати епюри розподілу напружень в перерізі шпура з пластиною – вставкою

товщиною 5...20 мм , а також зміни розподілу напружень в залежності від товщини пластини – вставки при різних механічних властивостях породи. Обґрунтовано вибір оптимального діапазону товщини пластини – вставки в залежності від відношення напружень σ_x/σ_y при максимальному тискові P в шпурі. Отримані матеріали досліджень свідчать про можливість керування напрямком відколу кам'яних блоків як в ізотропних породах, так і в породах різної анізотропії шляхом відповідної орієнтації агрегатів з пластинами-вставками в системі шпурів з НРС.

У третьому розділі розроблено методику проведення експериментів та лабораторне обладнання для випробування силових можливостей НРС, яке використовувалось в промислових умовах.

Проведено лабораторні експерименти на бетонних моделях, які імітували гірську породу, в тому числі і породу з анізотропними властивостями. Основним технологічним параметром, який характеризує ефективність використання НРС в гірничій технології, є тиск, який здатна розвивати суміш.

Четвертий розділ містить результати експериментальних досліджень ефективності використання пластин – вставок для руйнування підготованих бетонних моделей.

В п'ятому розділі викладено результати експериментів, проведених в промислових умовах. В результаті проведених на кар'єрі дослідів отримано такі практичні результати:

- збільшення товщини керуючої пластини-вставки підвищує точність керування напрямом тріщиноутворення, але одночасно пластина – вставка з максимальною товщиною 8 мм значно зменшує об'єм НРС в шпурі (до 26 %), що негативно впливає на запас енергії суміші, а тому відчутно зменшує можливості розширення тріщини відриву;

- пластина – вставка з мінімальною товщиною 5 мм зменшує точність керування напрямом тріщиноутворення, але збільшує об'єм НРС в шпурі на 16 %, що призводить до збільшення ширини тріщини відриву;

- конструктивні особливості пристрою унеможливають викиди (постріли) НРС зі шпурів, що значно покращує умови безпечної праці гірників;

- використання пристрою з торцевими обмежувачами дає можливість скоротити час розколу блоків за рахунок ізоляції об'єму НРС в шпурі;
- пристрій завдяки наявності запираючого пристрою створює можливість при розколюванні блоків використовувати поряд з енергією росту кристалів НРС енергію пари, яка виникає під час реакції НРС з водою;
- застосування агрегату з пластиною – вставкою надає можливість керувати процесом розколу блоків в заданому напрямку, що особливо важливо при виконанні робіт в анізотропному масиві;
- простота конструкції пластини – вставки дає можливість виготовлення пристрою безпосередньо в майстерні кар'єру;
- при використанні розробленої технології на 20 % зменшується кількість витрат НРС;
- завдяки керуванню напрямком розвитку відкольної тріщини в міжшпуровому проміжку площа поверхні відколу блоку відповідає вимогам відносно якості даної продукції;
- встановлено, що запропоновані результати дисертаційних досліджень мають практичну цінність для реалізації енерго – ресурсоощадливого видобування та попереднього оброблення блоків з лабрадориту в умовах Катеринівського кар'єру ПП «Кванта-ЛЧ» з очікуваним економічним ефектом від впровадження розробленого пристрою 21350 грн. на 1000 м² площини розколу.

Ключові слова: кам'яний блок, шпур, НРС, анізотропія, керуюча пластина, навантаження, напружений стан, тріщиноутворення.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

1. Фоменко І.О. Розробка та дослідження силових можливостей безпечного та енергозберігаючого агрегату для розколу монолітних об'єктів / І.О. Фоменко, І.М. Ковтун, О.І. Фоменко, А.І. Ковтун // Збірник наукових праць. – Київ, ДУ «Національний науково-дослідний інститут промислової безпеки та охорони праці». – 2013. – Вип.26. – С. 44 - 48.

2. Фоменко І.О. Розробка та дослідження процесу керування напрямом розколу блочного каменю при використанні невибухових руйнуючих сумішей / І. О. Фоменко, О. І. Фоменко, І. М. Ковтун, А. І. Ковтун // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2013. – Вип. 2/2013(12). – С. 50 – 57.

3. Фоменко І.О. Дослідження технологічних параметрів процесу керування напрямком розколу блочного каменю під час використання невибухових руйнуючих сумішей / І. О. Фоменко, А. І. Ковтун // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» Серія «Гірництво» – К. – 2014. – Вип. 26 – С. 63 – 69.

4. Фоменко І.О. Керування напрямом тріщиноутворення по осях ортотропії гранітів при використанні невибухових руйнуючих сумішей та агрегатів з пластинами-вставками / І. О. Фоменко, О. І. Фоменко, І. М. Ковтун, А. І. Ковтун // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського.– Кременчук: КрНУ, 2015. – Вип. 2(16). – С. 41 – 48.

5. Кравець В.Г. Удосконалення технології для безпечного розколу гранітних блоків при використанні невибухових руйнуючих сумішей / В.Г. Кравець, Н.А. Праховнік, А.І. Ковтун // Проблеми охорони праці в Україні. – Київ, ДУ «Національний науково-дослідний інститут промислової безпеки та охорони праці». – 2016.– Вип. 32. – С. 111 – 117.

6. Кравець В.Г. Теоретичне визначення технологічних параметрів керованого розколу гірської породи невибуховими руйнуючими сумішами / В.Г. Кравець, С.М. Стовпник, А.І. Ковтун, П.З. Луговий // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. КрНУ, 2017. – Вип. 2/2017(20). – С. 15 – 25.

7. Стовпник С.М. Формування тріщини відриву при видобутку блокового каменю / С.М. Стовпник, А.І. Ковтун, Н.Ф. Качинська, О.С. Прит // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. – Житомир: ЖДТУ, 2017. – № 2/(80). – С. 200 – 206.

8. Патент 90941 на корисну модель, Україна МПК E21C 37/00. Шпурова вставка для направлено розколу монолітних об'єктів невибуховими розширюючими сумішами / І. О. Фоменко, О. І. Фоменко, А.І. Ковтун ; заявл. 06.02.2014; опублік. 10.06.2014. Бюл. №11.

9. Патент 92446 на корисну модель, Україна МПК E21C 27/14. Шпурова вставка для направлено розколу монолітних об'єктів невибуховими розширюючими сумішами / І. О. Фоменко, О. І. Фоменко, А.І. Ковтун ; заявл. 16.04.2014; опублік. 11.08.2014. Бюл. №15.

10. Патент 106912 на корисну модель, Україна МПК E21C 37/00. Шпурова вставка для направлено розкол монолітних об'єктів невибуховими розширюючими сумішами / А.І. Ковтун ; заявл. 19.11.2015; опублік. 10.05.2016.

11. Фоменко І.О. Аналіз технологічних особливостей керування напрямом тріщиноутворення в шпурах гранітних блоків при використанні невибухових руйнуючих сумішей / Фоменко І.О., Ковтун А.І. // Сталій розвиток промисловості та суспільства: (г. Кривий Ріг 2014): матеріали міжнародної науково-технічної конференції . ДВНЗ Криворізький національний університет.– С. 7 – 8.

12. Ковтун А.І. Підвищення екологічної безпеки на кар'єрах Житомирської області / А.І. Ковтун // Ресурсозбереження і екологічна безпека технологічних процесів промислового і цивільного будівництва : Тези доповідей VII Міжнародної науково – технічної конференції «Енергетика. Екологія. Людина», 15 – 17 травня 2015 р., Київ : НТУУ «КПІ», 2015. – С. 37 – 39.

13. Ковтун А.І. Підвищення безпеки використання невибухових руйнуючих сумішей (НРС) при видобутку штучного та декоративного каменю на кар'єрах / А.І. Ковтун // Проблеми охорони праці та цивільної: Збірник матеріалів 13-ї всеукраїнської науково-методичної конференції. 10-12 листопада 2015 р., Київ : НТУУ «КПІ», 2015.– С. 171 – 175 .

ABSTRACT

Kovtun A.I. Improvement in the technology of controlled breaking of stone blocks by nonexplosive demolition mixtures. – Qualifying scientific work as a manuscript.

Theses for a Candidate Degree in Engineering Science, specialty 05.15.03 – open mining of mineral products. – National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kiev Polytechnic Institute”.

The thesis is devoted to the development of the scientific basis and justification for an improved method of mining of stone blocks with the use of non-explosive demolition mixtures (NEDM) and control insert plates.

Subject of research: processes of forming a separation monocrack in a block of decorative stone in a cost-effective way.

Scope of research: parameters of the stress-strain state of rocks of various degree of anisotropy around the boreholes with NEDM in the presence of a device for controlled cracking.

The scientific novelty of the results obtained is as follows:

- Using the mathematical simulation technique, it was established that, when using NEDM in boreholes of a common diameter of 40 mm together with control insert plates of an effective thicknesses of 5...8 mm, a leading concentration of tensile stresses at the end faces of the plates is achieved, as well as a 20% decrease in the maximum uncontrolled deflection of the separation crack from the plane of the boreholes;

- It has been proved theoretically that the magnitude of uncontrolled deflection of the separation crack from the plane of the boreholes in a rock mass is related with the anisotropy index $\chi = \sigma_{PX} / \sigma_{PY}$, the thickness h of the insert plate and the angle β of its orientation relative to the main axis of anisotropy by dependencies of the logarithmic type;

- It has been proved analytically that the use of insert plates of reasonable thickness ensures the controlled formation of a separation crack while making it possible to increase the distance between boreholes by 25% and decrease the consumption of NEDM by 18...20%.

Practical importance of the results obtained consists in the development of:

- A technique for determining technological parameters and a method for creating static loads with the help of NEDM and insert plates at the boundary of the borehole contour for the separation of stone blocks in a static mode;

- A set of portable equipment, covered by letters patent, that creates a pressure of up to 40 MPa on the walls of a borehole, which is sufficient for breaking the rock, whereas the development of said equipment followed the analysis of the theoretical and experimental patterns of formation of the cracking zone with the use of NEDM and insert plates;

- Stone block breaking equipment and technology of its application which make it possible to increase the distance between boreholes by up to 25% while ensuring the formation of a continuous plane of rock cleavage; the equipment and technology have been successfully tested in a natural stone quarry.

The introduction provides a justification of the urgency of the topic of the dissertation, offers a general description of the work and substantiation of the necessity of conducting scientific research. It also presents the formulation of the goal and objectives of the research and demonstrates how the paper is related to scientific programs, topics, and plans.

Chapter 1 offers an analysis of the existing methods and means of extracting stone blocks and outlines the main factors influencing the choice of technology for the extraction of blocks.

Chapter 2 presents an analytical study of methods for controlling the direction of crack formation by a system of boreholes in the process of separating stone blocks using NEDM in the presence of a control insert plate. To control the direction of rock fracturing in the boreholes, the strain-stress state of the rock mass has been studied in detail. The mass is subjected to internal pressure as a result of the expansion of the NEDM divided into two volumes by a steel plate in the borehole, the pressure varying depending on the thickness of the insert plate. For this purpose, the stress-strain state of the rock mass was analyzed using an isotropic continuous medium model. Theoretical studies of the insert plate made it possible to obtain stress distribution diagrams in the borehole cross-section with an insert plate thickness varying from 5 to 20 mm, as well as changes in the

distribution of stresses depending on the thickness of the insert plate for various mechanical properties of the rock. The choice of the optimum range of insert plate thickness is substantiated depending on the stress ratio σ_x/σ_y at the maximum pressure P in the borehole. The study material obtained testifies to the possibility of controlling the direction of stone block cleavage in both isotropic rocks and rocks of various anisotropy by appropriate orientation of the devices with insert plates in the system of boreholes with NEDM.

Chapter 3 is devoted to developing a procedure for conducting experiments and laboratory equipment for testing the expansion capabilities of the NEDM, which was used under industrial conditions.

Laboratory experiments were conducted on concrete specimens simulating a rock, including rocks with anisotropic properties. The main technological parameter characterizing the efficiency of NEDM use in mining technology is the pressure that the mixture can develop.

Chapter 4 contains the results of experimental studies on the effectiveness of the use of insert plates for the demolition of prepared concrete specimens.

Chapter 5 describes the results of experiments carried out under industrial conditions. The experiments conducted in a quarry gave the following practical results:

- An increase in the thickness of the control insert plate improves the accuracy of controlling the cracking direction. However, the insert plate with a maximum thickness of 8 mm appreciably decreases the volume of NEDM in a borehole (up to 26%), which adversely affects the margin of energy stored in the mixture, and therefore significantly reduces its capacity to expand the separation crack;

- An insert plate with a minimum thickness of 5 mm reduces the accuracy of controlling the direction of cracking but increases the volume of NEDM in the borehole by 16%, which results in an increase in the width of the separation crack;

- The design features of the device prevent any discharges (shootouts) of the NEDM from the boreholes, which significantly improves the safety of miners when using the NEDM;

- The use of an appliance with end stoppers makes it possible to shorten the time of block splitting due to the isolation of the NEDM volume in a borehole;

- Owing to the presence of the locking appliance, the device makes it possible to use, along with the energy of NEDM crystal growth, the energy of steam produced by the reaction of the NEDM with water in the process of splitting the blocks;

- The use of the device with the insert plate allows for control of the process of block splitting in a given direction, which is especially important when working with anisotropic solid mass;

- The simplicity of the insert-plate design makes it possible to manufacture the device in situ, i.e. in the quarry workshop;

- When using the technology developed, the volume of NEDM consumption is reduced by 20%;

- Owing to control exercised over the direction of development of the separation crack in between the boreholes, the surface of the block cleavage face meets the requirements for the quality of such products;

- It is established that the proposed results of the thesis research are of practical value for the implementation of energy and resource-saving production and pre-treatment of labradorite blocks at the Kateryninsky quarry developed by Quanta-LCh, LLC. The expected economic effect from the introduction of the developed device is in the range of UAH 21,350 per each 1000 m² of the cleavage plane.

Key words: stone block, borehole, NEDM, anisotropy, control plate, load, stress state, cracking.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	14
РОЗДІЛ I. СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ З ВИДОБУТКУ	
КАМ'ЯНИХ БЛОКІВ	19
1.1. Аналіз сучасних методів та засобів відділення монолітів	19
1.2. Досвід використання НРС для видобутку блочної продукції	32
1.3. Мета і задачі досліджень	37
РОЗДІЛ II. ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ КЕРОВАНОГО	
ТРІЩИНОУТВОРЕННЯ ПРИ ВИКОРИСТАННІ НРС	39
2.1. Поле напружень в зоні дії шпура з НРС в присутності керуючої пластини – вставки.....	39
2.2. Модельні дослідження напруженого стану навколо шпура із застосуванням програми “ANSYS”	49
2.3. Дослідження процесу керування напрямком тріщиноутворення	56
Висновки до розділу	71
РОЗДІЛ III. ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ	
ДОСЛІДЖЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ НРС ТА ПЛАСТИНОЮ- ВСТАВКОЮ	73
3.1. Методика проведення лабораторних досліджень.....	73
3.2. Визначення потенційних силових можливостей НРС для лабораторних досліджень	81
3.3. Обґрунтування відстані між шпурами з НРС та пластиною-вставкою.....	85
Висновки до розділу.....	89
РОЗДІЛ IV. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КЕРОВАНОГО	
ТРІЩИНОУТВОРЕННЯ В МОДЕЛЯХ З ВИКОРИСТАННЯМ НРС ТА АГРЕГАТУ З КЕРУЮЧОЮ ПЛАСТИНОЮ-ВСТАВКОЮ.....	90
4.1. Обґрунтування основних вимог до пластин-вставок.....	90
4.2. Розробка конструкцій експериментальних агрегатів з пластинами- вставками.....	91
4.3. Особливості деформування моделі шпура з НРС та пластиною -	

	13
вставкою.....	96
4.4. Лабораторні дослідження тріщиноутворення в модельних матеріалах.....	100
Висновки до розділу.....	107
РОЗДІЛ V. ВИПРОБУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ СПОСОБУ В ПРОМИСЛОВИХ УМОВАХ.....	109
5.1. Промислові дослідження методу керування напрямом розколу декоративного каменю.....	109
5.2. Відпрацювання в промислових умовах параметрів шпурів в системі.....	114
5.3. Економічна ефективність видобутку блоків при впровадженні розроблених технологій та засобів.....	118
Висновки до розділу.....	120
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	122
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	124
ДОДАТКИ.....	141
ДОДАТОК А.....	141
ДОДАТОК Б.....	143

ВСТУП

Актуальність теми. Україна – одна з небагатьох країн світу, де в межах Українського кристалічного щита розташовані багаті та унікальні родовища природного каменю, який широко застосовується в різних галузях будівництва та архітектури.

Одна з головних проблем при видобутку природного каменю – це необхідність зменшення втрат кам'яної продукції в процесі відділення монолітів від масиву і підвищення її якості. Основним технологічним процесом, що змінює агрегатний стан каменю, є підготовка його до виймання.

Сучасні досягнення науки і техніки дають можливість збільшити продуктивність видобутку і обробки каменю, понизити вартість видобування сировини і виготовлення готової продукції, значно інтенсифікувати продуктивність каменедобувного виробництва.

Удосконалення відомих і розробка нових ефективних методів та засобів видобутку кам'яних блоків повинні забезпечувати підвищення економічних показників виробництва та його конкурентоздатність на сучасному світовому ринку природного каменю. Через видиму перевагу статичних режимів відділення монолітів декоративного каменю над динамічними завдяки збереженню цілісності монолітів гірничо-практика при можливості схиляється до розробки таких родовищ статичними методами. За результатами досліджень одним з найбільш перспективних статичних способів видобутку природного каменю є руйнування невибуховими руйнуючими сумішами (НРС). Ефективне застосування НРС потребує вивчення закономірностей протікання фізичних та механічних процесів в скельному середовищі в часі реалізації методу. Ці питання вимагають виконання досліджень з встановлення закономірностей формування напружено – деформованого стану природного каменю в часі розширення НРС в системі шпурів з урахуванням особливостей структури і текстури скельного масиву.

Ефективне застосування НРС потребує вивчення закономірностей протікання фізичних та механічних процесів в скельному середовищі в часі реалізації методу. Ці питання вимагають встановлення закономірностей формування напружено –

деформованого стану природного каменю в часі розширення НРС в системі шпурів, розробки на їх основі методів керованого відколювання в умовах анізотропного скельного масиву з метою отримання якісної суцільної площини відриву та відповідно удосконалення технологічних параметрів видобутку кам'яних блоків. Розв'язання цього **актуального науково – практичного завдання** дасть змогу підвищити ефективність технології видобування декоративного каменю, покращити якість блокової продукції та скоротити втрати цінної сировини.

Зв'язок роботи з науковими програмами, темами. Виконана автором дисертаційна робота є складовою частиною досліджень Інституту енергозбереження та енергоменеджменту НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського» відповідно до плану держбюджетної тематики Міністерства освіти і науки України у рамках ініціативної науково-дослідної роботи «Розробка енергозберігаючого обладнання для видобутку гранітних блоків», що виконувалась на кафедрі охорони праці, промислової та цивільної безпеки (№ держреєстрації 0112U0084050), у якій автор брав участь як співвиконавець.

Мета та задачі досліджень. Метою роботи є теоретичне і експериментальне обґрунтування раціональних технологічних параметрів видобутку кам'яних блоків шпуровим методом шляхом утворення в анізотропній породі тріщини відриву заданого напрямку з допомогою НРС і керуючої пластини – вставки.

Відповідно до поставленої мети поставлені наступні задачі досліджень:

- вибір і обґрунтування теоретичної моделі гірської породи з визначенням параметрів напруженого стану навколо шпура при дії НРС в залежності від товщини керуючої пластини – вставки та її орієнтації відносно більшої осі анізотропії породи;
- дослідження закономірностей розвитку в процесі кристалізації НРС головних розтягуючих напружень з урахуванням анізотропії природного каменю для керування напрямком тріщиноутворення;
- розробка методичних рекомендацій та технологічних параметрів застосування шпурової системи з агрегатом на основі пластини – вставки і впровадження у виробництво комплексу обладнання для керованого формування тріщини відриву в анізотропному скельному масиві.

Об'єкт дослідження – процеси формування в ощадливому режимі відривної монотріщини в масиві декоративного каменю.

Предмет дослідження – параметри напружено – деформованого стану гірської породи різного ступеня анізотропії навколо шпурів з НРС в присутності агрегату для керованого тріщиноутворення.

Методи досліджень. В дисертації використано комплекс сучасних методів досліджень: аналіз та узагальнення науково-технічних досягнень у галузі технології видобутку кам'яних блоків; математичний апарат для розв'язання плоских задач теорії пружності схем навантаження шпурів; атестований програмний скінченноелементний комплекс “ANSYS Workbench”, експериментальні методики визначення навантаження шпурів за допомогою НРС, лабораторні дослідження, а також полігонні дослідження процесів, які супроводжують розкол блоків в реальних виробничих умовах.

Наукова новизна отриманих результатів, що виносяться на захист, представлена науковими положеннями, в яких вперше:

– встановлено методом математичного моделювання, що при використанні НРС в шпурах поширеного діаметра 40 мм з керуючими пластинами – вставками раціональної товщини 5...8 мм досягається випереджуюча концентрація розтягуючих напружень на торцях пластин та зменшення на 20 % максимального некерованого відхилення тріщини відриву від площини шпурів;

– модельними дослідженнями доведено, що величина довільного відхилення тріщини відриву на кут « α » від площини шпурів в породному масиві пов'язана залежностями логарифмічного типу з показником анізотропії породи, з товщиною пластини-вставки в шпурі та кутом орієнтації пластини « β » відносно більшої осі анізотропії;

– аналітично доведено, що використання пластини – вставки раціональної товщини дозволяє за рахунок керованості формування тріщини відриву збільшити відстань між шпурами на 25 % із зменшенням на 18...20 % витрати НРС.

Практичне значення одержаних результатів полягає в наступному:

– розроблено методику визначення технологічних параметрів і спосіб створення статичних навантажень з допомогою НРС і пластин – вставок на межі контуру шпурового отвору для відділення кам'яних блоків в статичному режимі;

– виходячи з аналізу отриманих теоретичних і експериментальних закономірностей формування зони тріщиноутворення з використанням НРС і пластин – вставок, розроблено комплекс портативного обладнання для створення тиску (до 40 МПа) на стінки шпура для розколу породи, підтверджений патентами на винахід;

– розроблено обладнання та технологію його застосування для розколу кам'яних блоків, що дозволяють збільшити відстань між шпурами на величину до 25 % при забезпеченні формування суцільної площини відколу породи, яка успішно випробувана на кар'єрі з видобутку блоків природного каменю;

– наукові результати досліджень реалізовано в навчальному процесі Інституту енергозбереження та енергоменеджменту НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського».

Особистий внесок автора в наукові праці, які опубліковані з співавторами. Визначено мету і задачі досліджень, в роботі [106,130] – розраховано епюри тиску навколо шпуру з пластиною – вставкою; [107] – розроблено принцип дії пластини – вставки; [116] – запропоновано безпечний спосіб розколу кам'яних блоків; [134] – розроблено принцип тріщиноутворення в залежності від анізотропії породи; [135] – визначено технологічні параметри тріщиноутворення, провів аналіз результатів; [97, 98, 99] – розроблено конструкцію пластини-вставки; [131] – визначено раціональну технологію відокремлення кам'яних блоків.

Апробація результатів дисертації. Основні результати дисертаційної роботи представлено на конференціях: Міжнародна науково-технічна конференція «Сталий розвиток промисловості та суспільства» (м. Кривий Ріг, 2014 р.); VII Міжнародна науково – технічна конференція «Енергетика. Екологія. Людина» (м. Київ, 2015 р.); 13-а всеукраїнська науково-методична конференція «Проблеми охорони праці та цивільної безпеки» (м. Київ, 2015 р.).

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 13 наукових праць, у тому числі 5 статей в фахових виданнях України, 3 з яких включено до міжнародних наукометричних баз даних, 3 патенти України на корисну модель, 3 тез доповідей на міжнародних та національних конференціях та 2 статті в інших виданнях.

Структура та обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, додатків, списку використаних літературних джерел, який містить 135 найменувань. Загальний обсяг дисертації 144 сторінки, робота містить 59 рисунка, 11 таблиць, 2 додатки.

РОЗДІЛ І

СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ З ВИДОБУТКУ КАМ'ЯНИХ БЛОКІВ

1.1. Сучасні методи та засобів відділення монолітів

Одна з головних проблем при видобутку природного каменю – це постійна необхідність зниження втрат продукції і збільшення виходу якісних блоків з масиву, що розроблюється. Актуальними є також напрямки як використання, так і вдосконалення обладнання, зниження економічних витрат (трудових, економія електроенергії на підприємстві та інших економічних показників) при видобутку блоків, підвищення якості кам'яної продукції, що випускається. Стан сучасної науки і техніки дає можливість збільшити продуктивність видобутку і обробки каменю, понизити вартість видобувної сировини і готової продукції, значно інтенсифікувати продуктивність каменеобробного виробництва [1].

Вибір технології видобутку кам'яних блоків є комплексною задачею, на вирішення якої впливають:

- геологічні особливості масиву;
- міцнісні характеристики кам'яного масиву;
- наявність та ступінь природної тріщинуватості породи;
- неоднорідність властивостей, структури та текстури гірської породи;
- вимоги до якості блоків;
- вимоги до кінцевого продукту виробництва (поліровані облицювальні плити, декоративні вироби, архітектурні елементи споруд та ін.);
- економічні можливості підприємства;
- запланований об'єм виробництва.

Пропоновані методи та засоби видобутку кам'яних блоків вдосконалюються в напрямку пошуку рішень, спрямованих на максимально можливе сумісне врахування більшості наведених природних та технологічних чинників з метою отримання якісної продукції з мінімумом втрат цінної мінеральної сировини в межах встановлених обсягів.

При видобутку декоративного блокового каменю необхідно максимально зберегти природну монолітність і цілісність окреможестей, які видобуваються. Забезпечити збереження цілісності каменю при видобутку можливо тільки прямим або опосередкованим обмеженням руйнуючих зусиль поза площиною відокремлення блоку від масиву. Техніка виконання робіт має проводитись таким чином, щоб створювалися тільки місцеві напруження, які концентруються в напрямку бажаного відколу, з виключенням руйнуючих зусиль.

Поряд з натуральними показниками ефективності (собівартість продукції, прибуток, рентабельність та інше.) в практиці гірництва і наукових досліджень знаходить застосування показник відносної важкості видобутку корисної копалини, який охоплює всі технологічні процеси. Стосовно до кар'єрів блокового каменю визначення його також має свою специфіку, оскільки тут окремі процеси неспівставні за праце місткістю.

Найбільш праце місткі і дорогі процеси підготування каменю до видобування і розробки його на товарні блоки. Їх доля в собівартості блочної продукції складає 50 – 90% [1]. Витрати на решту процесів незначно пов'язані з механічними властивостями порід. Тому оцінку відносної важкості видобутку кам'яних блоків можна повно зробити по витратах на відокремлення монолітів від масиву. При цьому необхідно враховувати, що видобуток кам'яних блоків пов'язаний з одержанням монолітних блоків великого об'єму і маси, потрібних розмірів і форми. Це досягається за рахунок направленою руйнування породи, яке по праце місткості значно більше, ніж суцільне руйнування. Звідси впливає, що загальний показник трудності руйнування породи, прийнятий для кар'єрів інших галузей, не підходить до кар'єрів блокового каменю.

Роль геотехнічної і гірничої механіки гірських порід в нових умовах висувається як найважливіша частина гірничої науки, яка об'єднує велику кількість дисциплін для вирішення питань видобутку корисних копалин [1].

Розробка родовищ декоративного каменю в загальному напрямку гірничого виробництва має свою специфіку, яка відрізняється від технології масового видобування руд та будівельних матеріалів. Основною відмінністю є цінність

видобувної декоративної сировини і відповідно необхідність розробки ощадливих методів відділення від масиви з мінімально можливими втратами продукції. Однак поряд з ним розвиток галузі диктує підвищення інтенсивності ведення гірничих робіт, що на сучасному етапі вирішується одночасним використанням переваг динамічних і статичних навантажень в комбінованій технології видобування кам'яних блоків.

Найбільш відомі сучасні методи, способи та засоби видобутку кам'яних блоків, що знайшли використання в гірничій промисловості, представлені (рис. 1.1) [1-5].

Проведемо аналіз існуючих методів та технологій, які використовуються для видобутку кам'яної продукції на підприємствах гірничої промисловості України.

Основою технології видобутку корисних копалин є руйнування гірських порід, яке при розробці родовищ часто виконується за допомогою енергії вибуху. Проведення робіт з застосуванням енергії вибухових речовин повинно базуватися на основі фундаментальних наукових досліджень по найважливішим розділам геодинаміки – сформованого за останні роки наукового напрямлення по вивченню поведінки різних породних масивів під дією динамічних (головним чином вибухових) навантажень.

Розвинуті в наукових працях В.Г. Кравця [6-9], В.В. Бойка [10-12], О.О. Вовка [13-14], В.Д. Воробйова [15-16], Г.І. Покровського [17], Е.І. Єфремова [18-19], В.В. Воробйов [20-21], В.М. Мосинця [22-24], К.Н. Ткачука [25-26], В.О Шлапака [27-28], П.З. Лугового [29-30], К.К. Ткачука [31-33], М.Т. Бакки [2, 34-36], Ю.Г. Карасёва [3-4] та інших вчених положення про руйнування гірських порід вибухом характеризують різні сторони цього процесу, визначають закономірності його протікання, встановлюють результати механічної дії вибуху.

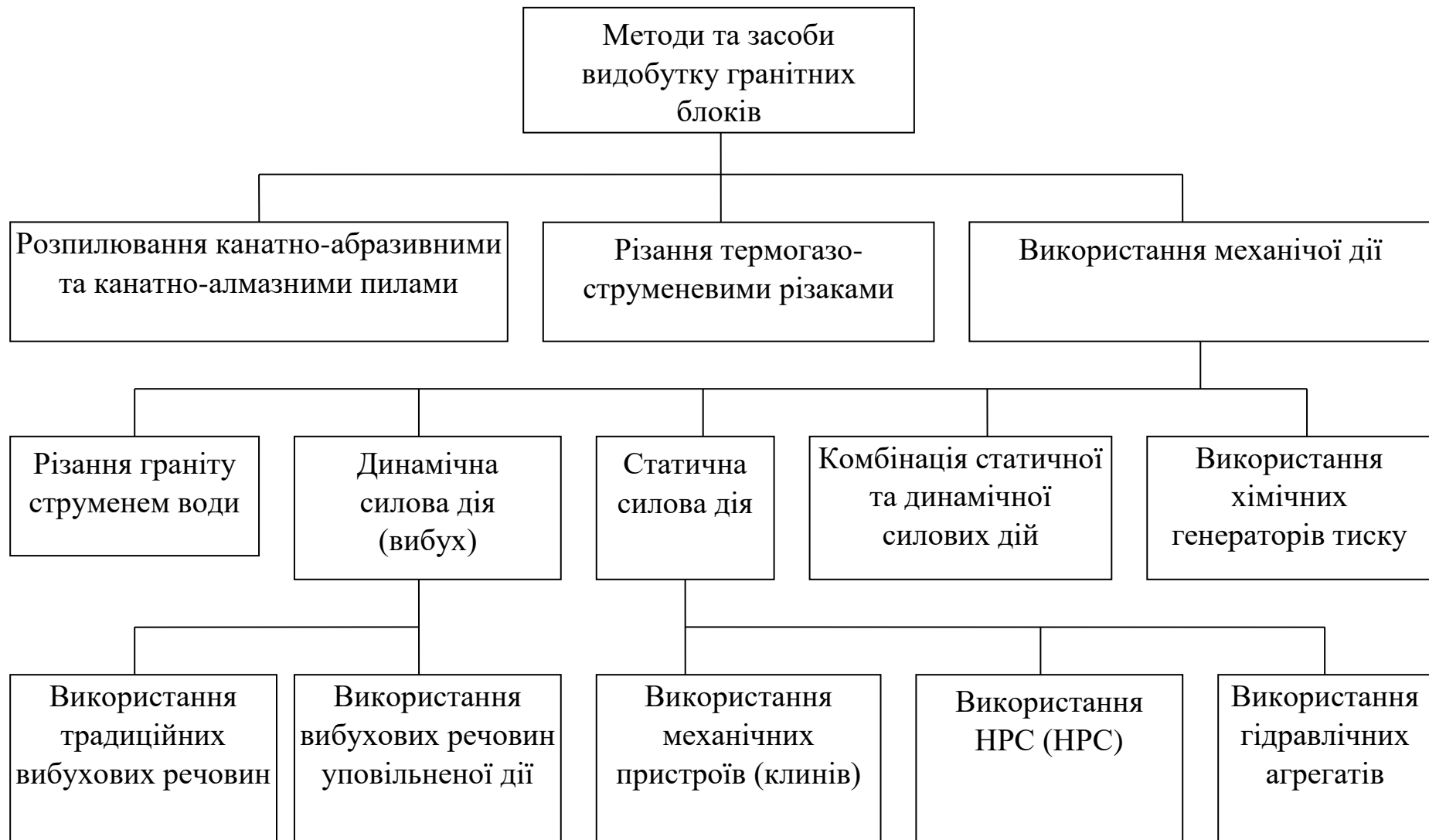


Рис. 1.1. Класифікація методів та засобів видобутку гранітних блоків

Все більш ускладнені умови, які супроводжують розкривання і розробку корисних копалин, освоєння нових родовищ зі складними геологічними умовами, а також виконання вибухових робіт при відбій ці кам'яних блоків пред'являють підвищені вимоги до наукових рекомендацій, методів, засобів і технологіям виконання вибухових робіт. Ця обставина визначає необхідність постійного вдосконалення існуючих і розробку нових методів дослідження вибухових процесів в неоднорідних середовищах.

Вирішення технологічних задач вибухового руйнування міцних скельних порід не обмежується лише підготовкою корисних копалин до виймання шляхом подрібнення та відділення частини масиву. Призначенням вибуху є також такі задачі, як оконтурювання масиву з метою гасіння сейсмічної хвилі на масових вибухах, захисту масиву поза блоком, що підривається, обережне відділення монолітів декоративного каменю від основного масиву без пошкоджень моноліту і прилеглого масиву.

В наш час розроблені та використовуються різні види вибухових технологій, а саме: вибуховий відбій блоків з використанням димного пороху, гурита; використання пластичних та ВР з малою густиною; використання бризантних ВР; використання гідроімпульсного обладнання; видобуток блоків за допомогою шнуру, що детонує; відколювання каменю зарядами направленої дії; використання електроімпульсного гідровибуху. Досить широке застосування для створення контурних щілин і відбійки блоків знайшли кумулятивні заряди різних конструкцій. Для їх використання також пробурюється строчка шпурів по лінії запланованого відколу.

Вибухова технологія видобутку кам'яних блоків відрізняється від видобутку механічними засобами, перш за все, меншими витратами праці, а також можливістю отримати при невеликій масі ВР значну енергію силового імпульсу. Саме тому вибухова технологія й отримала розповсюдження на кар'єрах з видобутку каменю, особливо для видобутку високоміцних його різновидів.

Слід підкреслити, що вибухова відбійка породних монолітів знайшла широке розповсюдження на кар'єрах по видобутку блокового каменю, для міцних його

різновидів (гранітів, пісковиків). Враховуючи, що дана робота присвячена саме технологіям з використанням шпурових методів, було вирішено розглянути різні аспекти цього методу.

Контурне або ошадливе підривання, призначене для видобутку кам'яних блоків повинне забезпечувати по можливості регулярну та рівну поверхню відриву порід і зниження ступеня порушення масиву [37].

При видобутку гранітних блоків має перевагу варіант, коли від масиву відокремлюють моноліт, який потім розділяють на блоки потрібних розмірів. На зміну малоефективному методу видобутку монолітів значних розмірів з допомогою проморожування шпурів прийшов вибуховий спосіб з розміщенням в шпурі пороху або двох ниток ДШ, що спричинило утворення мікро і макротріщинуватості. Для покращення якості гранітних блоків розроблений "Фінський" метод, який заснований на використанні нового ВР для м'якого підривання і детонуючий шнур фірми "Форсіт" [38]. Покращення якості блоків було досягнуто завдяки поєднанню швидкості детонації (1800 м/с) з досить низькою теплою вибуху (1500 кДж/кг). В Україні цей метод не знайшов розповсюдження тому, що ВР, яка виробляється в Росії "Гранулем", досить дорога і досить небезпечна при її використанні [38].

Однією з подібних технологій, яка розрахована на відокремлення моноліту від масиву за рахунок силової дії є використання генератора тиску хімічного «Літокол» (ГТХ «Літокол») [39]. По швидкості навантаження породи, цей засіб займає проміжне становище між динамічною та статичною силовою дією, тобто між порохом та НРС. При використанні ГТХ «Літокол» відсутній вплив згоряння двокомпонентної суміші в режимі швидкісного горіння на утворення непередбачених тріщин та мікротріщин як в моноліті, який відколюється, так і в масиві.

В літературі описаний спосіб видобування кам'яних блоків з допомогою шпурів [40], в яких розміщені герметичні заряди і збудження в них реакції, яка супроводжується виділення газів. В цих зарядах використовується рідкі або пастоподібні реагенти з бездетонаційною реакцією розкладання. Застосування такого способу пов'язане з використанням хімічних реагентів, які вимагають

спеціального режиму безпеки робіт, їх зберігання та доставки до місця ведення робіт. При протіканні хімічної реакції в реагентах в атмосферу виділяються шкідливі гази високої температури [40].

Аналогічний недолік мають відомі способи безполуменевого підривання. Це кардокс і гідрокс. При застосуванні кардоксу відбувається перехід рідкої вуглекислоти в газоподібний стані за рахунок теплоти, що виділяється під час займання горючої речовини, яка розміщена в патроні з вуглекислотою, а при використанні гідроксу виникає реакція скипання суміші хімічних речовин, що супроводжується виділенням теплоти і газоподібних водяної пари, вуглекислоти, азоту. При цьому патрони з рідкою вуглекислотою або хімічним складом розміщують в шпурах по лінії відколу. Способи кардокс і гідрокс характеризуються низькою ефективністю, що зумовлює необхідність застосування великих мас реагентів, збільшення обсягів буріння шпурів і, відповідно, вартості видобутку блокової продукції. Реалізація такої технології пов'язана з високою небезпекою ведення робіт, що обмежує сферу застосування способів [41].

Відомі також методи розпилу монолітних об'єктів, які базуються на поступовому їх стиранні по лінії спрямованого руйнування. Ці способи, засновані на створенні щілини за допомогою ріжучих дискових робочих органів, алмазно канатного розпилу, каменерізні бурові установки [42]. Застосування таких методів обмежується породами з низькою міцністю. Для руйнування за рахунок відколу і розколу в масиві, що руйнується, створюються система напружень, причому їх дія може бути тривалою (статичні), короткочасною (імпульсно-динамічний) і переривчастою (вібраційний). В роботі [43] досліджено вплив відхилення шпурів на ефективність алмазно-канатної технології виймання блоків. Встановлено, що неточність збійки зумовлена неточністю встановлення бурового верстата. Показано, що певний об'єм втрат сировини викликано похибками підготовчого буріння при алмазно-канатному способі відокремлення блоків.

Аналіз, приведених вище робіт, підкреслює актуальність розробки та впровадження нових способів невибухового руйнування гірських порід.

Застосування статичних методів руйнування скельних порід дозволить вирішити зазначені недоліки вибухового та безполуменевого руйнування. На даний час розроблено багато способів невибухового руйнування: механічні методи (клиновий, гідроклинові, алмазно канатне різання, бурові установки і комбайни), методи, засновані на енергії рідини (флюїдоразрив, гідродинамічний, фізико-хімічних імпульсний розрив, гідроудар, гідрорізання), теплові (терморізання), електричні і електромагнітні (підривання електричних провідників, електричний пробій, тепловий пробій, струмами високої частоти, плавленням, лазерним випромінюванням, електромагнітне випромінювання), комбіновані методи [44].

Клини, гідроклини, гідравлічні скелеломи використовують для статичного способу видобутку кам'яних блоків і при цьому руйнування гірських порід досягається за рахунок створення напружень, на стінках шпура, які перевищують межу міцності породи на розтяг. При ручному розклинюванні в заздалегідь пробурені шпури забивають металеві клини зростаючого діаметру. На практиці знайшли застосування ручні клини різних конструкцій, а саме: прості, з допоміжними щічками, складні [1].

Як правило, довжина клинів лежить в діапазоні від 120 до 250мм, що забезпечує розколювання каменю площею від 1 до 2м². Кут загострення ручних клинів дорівнює 10...12,5° [35,36].

Використання ручних клинів для вітчизняних кар'єрів з малим видобутком кам'яної продукції дозволяє економити кошти на придбанні дорогих машин і механізмів та забезпечує потрібну якість блоків, але суттєво знижує продуктивність підприємств через використання важкої фізичної праці, з низькою продуктивністю.

Процес розколювання гранітного блоку за допомогою ручних клинів представлено (рис. 1.2).



Рис. 1.2. Розкол гранітного блоку ручними клинами

Слід відзначити, що мала величина меж міцності порід на відколювання свідчить про перспективність розвитку і вдосконалення клинового методу відколу каменю. В монографії [1] при використанні клинового методу розглядаються лише холості додаткові шпури, вільні від навантажень. В цьому плані резерв способу полягає в поєднанні клинового методу з будь-яким сучасним статичним методом навантаженням холостих шпурів. Таке поєднання дозволить використати

Подібну дію на гірську породу справляють пристрої розклинюючої дії гідроклини, конструкція яких дозволяє руйнувати породу шляхом підвищенні тиску рідини в елементах гідросистеми пристрою в межах, достатніх для створення відривного зусилля. Так, наприклад, тиск може досягати величини 45 МПа в установці КМ - 45 і 100 МПа в установці ГРУ [45].

Для відколу міцних гранітів використовують також гідророкспліттери (Hydro Rock Splitter - HRS). HRS нової конструкції представляє собою гідравлічний прилад свердловинного типу для створення направленою навантаження на стінки свердловини [46]. Такі гідравлічні агрегати для розколювання монолітних блоків

передбачають використання еластичної камери, усередину якої нагнітається робоча рідина під тиском. Основні елементи HRS представлені на (рис. 1.3).

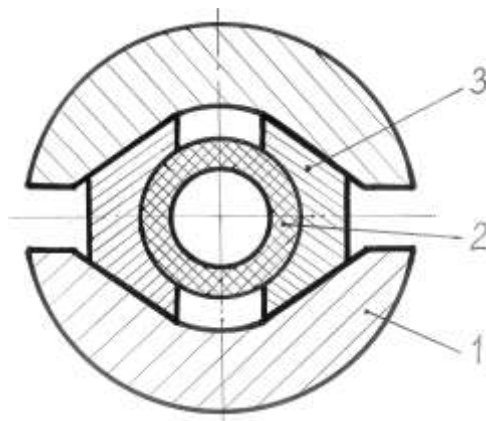


Рис. 1.3. Схема HRS: 1 - пунсони, що висуваються; 2 - еластична камера; 3 - клини.

Гідроокислители мають такі переваги над гідроклінами: не потребують системи зворотного ходу; співвідношення розривного зусилля до маси агрегату (так званий індекс, який характеризує досконалість конструкції агрегату) [46]. Вони приблизно в 4-6 разів перевищують такі ж показники в німецьких гідроклінів «Дарда» та японських «Хірадо»; маса HRS приблизно на порядок менша, ніж у гідроклінів, що забезпечує його ручне транспортування в умовах кар'єру.

Слід зазначити, що гідроокислитель є лише робочим органом. Саме устаткування HRS - обладнання складається з: комплекту гідроокислитерів; шлангів високого тиску; гідравлічного розподільника; маслостанції високого тиску з ручним, електричним або пневматичним приводом; комплекту технологічних пристосувань. Суттєвий недолік використання HRS-обладнання полягає у тому, що у разі необґрунтовано вибраних технологічних параметрів (відстані між шпурами та глибини шпурів) відбувається деформація корпусу агрегату з переходом круглого перетину в еліпсоїдальний. У таких випадках має місце заклинювання агрегатів в шпурах, що не дозволяє забезпечити отримання магістральної тріщини у потрібному

напрямку і потребує додаткових витрат на визволення агрегатів з деформованим корпусом з порожнини шпурів [47].

Імпульсне навантаження на породу використовується в роботі каменескольних пресів з адаптивними робочими органами [48], продуктивність яких збільшується зі збільшенням нерівностей поверхні і площею розколювання зразка. Утворення вертикальної тріщини і відділення блоку від масиву при руйнуванні блоків вапняку і доломіту відбувається з допомогою гідромолотів, які завдають ударів вздовж лінії відколу на глибину 50 - 200 мм. Найбільш розповсюджені гідромолоти СОІ - 146 на базі екскаватора ЕО - 4121. Слід зазначити, що руйнування гірських порід ударним способом [48] є некерованим, та дорогим, а також вимагає застосування спеціальної техніки, має обмежену сферу застосування.

Досить досконалі методи – орієнтований флюїдорозрив [49], які засновані на використанні енергії рідини, розроблені в ІГД СО РАН. При їх реалізації на стінках шпурів надрізаються ініціюючі щілини, після чого в шпур вставляють пакер, через отвори якого подають флюїд (суміш води і глини різної консистенції). Від розширення рідини створюється високий тиск (до 80 МПа) на периферії щілини і тим самим забезпечується спрямований гідророзрив масиву. В роботі [50] руйнування гірської породи запропоновано виконувати вибухоімпульсним методом.

Відкол гірських порід заснований на застосуванні фізико-хімічного імпульсного розриву тіла породи струменями хімічно активної рідини стало можливим для видобутку кам'яних блоків. Рідина, наприклад, натрій, проникаючи в міжпросторові пори руйнує масив, вступає з ним в хімічні реакції, виділяючи при цьому енергію. У скельному масиві утворюються мікротріщини, що призводить до його руйнування. Масове утворення тріщин розриву в суцільних і пористих породах залежить від амплітуди і тривалості імпульсного навантаження [51].

Ідея патенту [52] на спосіб руйнування гірської породи базується на використанні теплої води в шпурі. Сублімація графітового стрижня при короткому замиканні перетворює воду в пар, створюючи тиск в шпурі, що і призводить до руйнування гірської породи. Розроблені також установки [53] для розрізання гірської породи струменем води під тиском (швидкість при цьому досягає 300 м/с і

більше). Тиск в робочій рідині досягає 350 МПа перед соплом.

Гідродинамічний спосіб руйнування гірських порід за допомогою імпульсних гідрогармат, що вистрілюють воду під великим тиском (до 800 МПа). У Швеції розроблена гідрогармата, яка під тиском 40 МПа вистрілює обсяг рідини 1,8 дм³ в пробурений шпур [54]. Руйнування відбувається під дію – гідродинамічного удару води та гідроімпульсних ефектів в результаті виникнення хвилі в водяному середовищі. При вибухогідравлічному руйнуванні твердих порід використовується вибухогідравлічний ефект. Кількість енергії, що отримується при ВГ – ефекті, визначається кількістю вибухової речовини в шпурі. При цьому рідина, приймаючи на себе тиск від вибуху, створює розривні напруження в гірській породі.

Вказані вище способи, покращують руйнування породи, але характеризується громіздкістю обладнання, вартістю, енергоємністю і небезпекою для робітників при їх використанні, а тому не мають широкого використання в гірництві.

В наш час використовують термогазоструменеві апарати двох основних типів: апарати, які працюють на бензо – повітряній УГР-1 [55], та на гасо – кисневій суміші (ТБ-33К і ТР-35) [55]. Газо – кисневі апарати мають високий газодинамічний ефект, малі габарити та масу, високу продуктивність. Однак вони вимагають стаціонарних умов експлуатації, спеціального обладнання для подачі кисню і складні в експлуатації. В практичному відношенні такі апарати більш небезпечні. Простішими за конструкцією, дешевшими і надійними є бензо-повітряні термогазоструменеві різакі. Як свідчать результати дослідів та промислових випробувань [56], продуктивність термогазоструменевих різаків залежить від зернистості породи, її твердості та вмісту багатокольорових мінералів та кварцу. При збільшенні розмірів мінеральних зерен ефективність термічного різання зростає.

Недоліком газоструменевого різання є підвищена небезпека такої технології. Найбільш поширеними нещасними випадками при роботі з термоінструментом є опіки, пошкодження очей шматочками породи, травми від ударів пневматичних рукавів, що розірвалися.

Електромагнітні способи руйнування гірських порід реалізуються

підриванням електричних провідників при подачі через розташований в шпурі з водою провідник імпульсу електричної енергії. В результаті провідник перетворюється в плазму з температурою $10^4 - 10^5$ °C, при цьому утворюється ударна хвиля, що руйнує породу. Імпульси в шпурі створюються генератором імпульсів, при цьому утворюються хвилі напружень, що призводять до руйнування порід. Розроблені також способи руйнування гірських порід з допомогою гістерезисного нагріву в полі індуктора; діелектричного нагріву струмами високої частоти; впливом електромагнітного випромінювання [57, 58].

Аналіз дифракційних явищ резонансного типу для ряду паралельних шпурів, навантажених внутрішнім гармонічним тиском показав, що за рахунок суперпозиції хвиль при відповідних хвильових числах досягається умови для утворення тріщини, в гірській породі, спрямованої через центри шпурових зарядів [59]. Створене інноваційне технологічне обладнання для реалізації резонансного навантаження стінок шпурів.

В роботах [60, 61] запропоновано зниження енергоємності руйнування гірських порід новим комбінованим енергозберігаючим обертово – гідрокавітаційним способом з магніто – індукційним фокусуванням кавітаційного потоку та інструменту для його реалізації. Ці методи буріння не знайшли широкого попиту із-за складнощів виготовлення потрібного обладнання.

Аналіз наведених вище різноманітних сучасних методів та засобів видобутку кам'яних блоків дозволяє стверджувати, що найбільш поширеним для цих методів є використання строчок шпурів для створення запланованої щілини відколу. Як правило, поперечний переріз цих шпурів має круговий контур. Таким чином в масиві, з якого видобувають блочні камені, або розколюють блок, штучно створюють послаблення каменю в потрібному напрямку. Огляд способів руйнування гірських порід показує, що більшість з них володіє високою енергоємністю і характеризуються великими витратами енергії, що вимагає застосування дорогого і конструктивно складного обладнання. Кожен з описаних способів має специфічну сферу застосування, тому виготовлене для його реалізації обладнання часто залишається не затребуваним.

Відзначимо, що найбільш послідовно, починаючи приблизно з вісімдесятих років минулого століття, розвивається і застосовується спосіб руйнування гірських порід, відколу кам'яних блоків, відбійки вугільних циликів, проходки тунелів, руйнування негабаритів або старих фундаментів на будівництві і в промисловості використовують статичні методи з використанням НРС. Нижче розглянемо відомі способи використання НРС і визначимо їх подальший розвиток.

1.2. Досвід використання НРС для видобутку блочної продукції

Аналіз науково – технічної літератури показує, що загальна кількість статичних способів руйнування, заснований на досягнення механіки, хімія, електротехніка і інші науки, невпинно зростає. Однак їх широке промислове використання стримується відсутність обладнання, незначна надійність, висока енергоємність, небезпечний вплив на людину, вартість.

Багато з цих способів знаходяться на стадії науково – дослідницьких і проектних розробок. Більшість їх вимагає застосування громіздкого і дорогого устаткування, що істотно обмежує можливість їх застосування. Всі ці недоліки змушують шукати шляхи створення і вдосконалення дешевих і перспективних способів руйнування міцних гірських порід. Одним з способів, позбавлених багатьох перераховані недоліків, є руйнування за допомогою НРС. Переваги цієї технології є відсутність динамічного впливу на природній камінь, звукові і інші коливань. Для реалізації способу не потрібно придбання дорогого спеціального обладнання або пристроїв, спосіб може бути реалізований поблизу транспортного і електричного обладнання, при цьому виключається можливість їх пошкодження через відсутність розльоту частин породи.

Для розуміння принципу дії НРС розглянемо процес виробництва та склад сучасних НРС. Процес виробництва складається з видобутку матеріалів (вапняки, доломіт і ін.). Приготування сировинної суміші (дроблення, помел та усереднення складу), випалу суміші (одержання гранул оксиду кальцію). При виробництві НРС

застосовуються природні матеріали, що містять, вуглекислий кальцій (вапняки, доломіт, вапняковий туф, крейда), що відносяться до осадових порід. Як добавки для підвищення вмісту в НРС оксиду кальцію застосовують природний гіпс, а також відходи промисловості, що складаються з дводонного гіпсу ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) або їх безводного сірчаноокислого кальцію ($\text{CaSO}_4 \cdot 0,5\text{H}_2\text{O}$) також їх суміші – фосфогіпс, бор гіпсу, фтор гіпс [62]. У вапняках як домішка присутній доломіт ($\text{CaCO}_3 + \text{MgCO}_3$). Реакція гідратації оксиду кальцію є екзотермічним і протікає бурхливо, що не дозволяє приготувати робочу суміш, помістити її в шпурі і підтримати стабільне протікання реакції в шпурі для отримання заданого результату. Тому для використання оксиду кальцію в складі НРС необхідно забезпечити уповільнення реакції гідратації при замішуванні. Це досягається шляхом пасивації. Пасивація може проводитися різними способами. Перша група способи засновані на спільному випалюванні сировинної матеріалу (вапняк, доломіт) зі спеціальними добавками при температурі, що перевищує температура декарбонізація вапняк ($1200 \dots 1500 \text{ }^\circ\text{C}$). Як добавки застосовуються силікати, алюмінати, ферити, а також сульфат кальцію [62]. Ефект пасивації досягається за рахунок укладення кристалів оксиду кальцію в кристали або твердий розчин фаз перерахованих вище добавок. Для спрощення технології виробництва і зниження температури випалу при спіканні вапна вводять відповідні добавки, наприклад, оксид міді [63 – 65], фторид кальцію [66-68]. Розробкою невибухових композицій і суміші займалися вчені Німеччини, Великобританія, США, Канада та ін. В даний час існує більше 100 різних НРС. Найбільша світова популярність здобули матеріали японські компанії Оноду Сімент Ко ЛТД (Брістар), Сумітомо Сімент Ко ЛТД (С-Майт), Ніппон Сімент Ко (Хемібрейкер), Кітатака ваккай коге (Супурітта) [69]. Ці виробники гарантують розвиток тиска розширення їх матеріалів статистичного руйнування 30 МПа протягом 24 годин. Матеріал «Кумумайт» спільне виробництво фірми Ніппон Сімент Ко, Ніппон юний і Хон гікей коге розвиває 50 МПа за той же час [70]. НРС розроблені в країнах Європи, відрізняються відносно невисоким тиском розширення. Так матеріал, виконаний за патентом НДР [71], розвиває тиск розширення через 4, 12 і 20 годин відповідно 7,5; 16,5; 22.5 МПа. У Чехословаччині

розроблені три складу невибухові композиції. Основною складовою є оксид кальцію (CaO) (по масі) – 94 – 99 %, який в комбінації з водною суспензією полугідрата сульфату кальцію прискорює процес гідратації [72-73]. В Іспанії [74] пройшов випробування і впровадженій у виробництво спеціальний цемент, що розширюється для руйнування порід для умов міської забудови, який при гідратації з водою розвиває тиск до 30 МПа. Аналіз існуючих сучасних невибухових руйнуючих сумішей більш повно розглянуто в роботі І.Г. Сахно [75].

В даний час розповсюджені склади НРС – 1 [76] і НРС – 80 [77], який представляє собою подрібнений продукт випалення карбонатних порід, забезпечений спеціальними добавками. Це порошкоподібний матеріал світло-сірого кольору, запилений, негорючий і вибухобезпечний, що володіє лужними властивостями. За даними авторів тиск розширення, що розвивається НРС – 80 при температурі навколишнього середовища 25- – 35 °С через 24 години після замішування 153 МПа досягає. Незважаючи на привабливі перспективи, практичне застосування НРС обмежене. Це можна пояснити висока чутливість руйнуючих складів до температурного режиму, точність дотримання водо – порошкового відносини при замішуванні, а найголовніше тривалий, порівняно з вибуховим способом, час руйнування.

Протягом останніх років постійно відбувався розвиток технології використання невибухових руйнуючих сумішей для видобутку кам'яних блоків займались вчені К.К. Ткачук [78-83], Касьян М.М. [84-87], І.Г. Сахно, [88-96].

НРС здатні розвивати в шпурах тиск до 40-50 МПа і використовуються для відокремлення моноліту від масиву і розколювання моноліту на блоки. Як показує практика, використання НРС для видобутку блоків може бути ефективним.

Аналіз досвіду використання НРС дав можливість визначити і певні проблеми цієї технології, а саме [37]:

- обмежений строк зберігання НРС та необхідність точно виконувати правила приготування суміші;
- проблематичність заповнення НРС горизонтальних шпурів, а також вертикальних шпурів з водою;

- час розвитку максимального тиску в шпурах залежить від погодних умов і може коливатись в діапазоні 24 – 48 годин;
- використання НРС обмежено температурою масиву в діапазоні 0 – 25° С;
- при температурі – 5 ° С руйнування породи настає тільки через 3 – 4 доби, а при більш низьких температурах дія НРС зовсім припиняється;
- використання електричних нагрівачів для підігріву НРС в шпурах при низьких температурах ускладнює технологічний процес;
- при приготуванні суміші, а також при заповненні нею шпурів обов'язкове використання таких засобів індивідуального захисту, як захисні окуляри, рукавиці, респіратор;
- при температурі вище +25 °С та інтенсивному протіканні реакції часто відбуваються «постріли» суміші з шпурів, що може бути причиною ураження працюючих ;
- у разі не спрацювання суміші повторне використання шпурів з затверділою НРС неможливе;
- після спрацювання НРС та утворення початкової вузької тріщини порожнини заповнених затверділою НРС шпурів неможна використовувати для подальшого відштотвухування моноліту від масиву з метою розширення тріщини та використання підйомно – транспортних машин.

В 1992-1997 роках в Київському політехнічному інституті Ткачуком К.К була здійснена розробка комплексної технології видобутку гранітних блоків, яка передбачає попереднє створення в породі направленої статичної силової дії з наступним поєднанням статичної силової дії з динамічною [80]. В більшості випадків для створення статичної силової дії і отримання в потрібних зонах породи необхідного напружено-деформованого стану використовувалась НРС. Теоретичні дослідження розподілу напружень навколо контура шпура виконувались лише для окремо взятого шпура, а потім, використовуючи принцип суперпозиції, робився висновок про взаємодію силових полів для всієї строчки шпурів. Оскільки при дії НРС навколо шпурів виникають пластичні зони, то використовувати принцип суперпозиції неправомірно, а треба розв'язувати нелінійні періодичні задачі, в яких

враховується взаємодія шпурів. Те ж саме можна сказати про взаємодію динамічних силових полів, які створювалися за рахунок використання ВР. Незважаючи на це, наведена комплексна технологія дала правильну якісну оцінку взаємодії силових полів і дозволила отримати такі позитивні результати: [80].

- створення перед вибухом в визначених зонах породи попередньо напруженого стану, що дозволило підвищити якість відколювання блоків та зменшити технологічні втрати кам'яної продукції;

- за рахунок використання в даній технології більш слабого динамічного силового імпульсу (вибуху) значно зменшується утворення мікротріщин в зоні шпурів з ВР, що також зменшує технологічні втрати продукції при подальшій його обробці.

Наведені вище позитивні сторони розробленої комплексної технології дозволяють підняти економічні показники виробництва за рахунок зменшення втрат кам'яної продукції.

У даний час ця технологія має поки що обмежене застосування, що пояснюється певною складністю в промислових умовах визначити оптимальне співвідношення між статичною та динамічною складовою технологічного процесу.

Практика застосування НРС для видобутку природнього каменю виявила нові проблеми, які потребують наукового підходу для їх вирішення. Одна з таких актуальних проблем, це керування напрямом тріщиноутворення в гірських породах.

На стадії розвитку технології використання НРС для видобутку гранітних блоків передбачався найбільш простий варіант, а саме заповнення НРС порожнини шпурів з відкритим торцем. Практика довела, що така спрощена технологія мала наступні недоліки [37, 90]: в теплу пору року реакція кристалізації суміші протікає швидко, що призводить до виникнення в шпурі парових пробок з підвищеним тиском і зумовлює періодичні інтенсивні «постріли» суміші з шпурів, що являє собою значну небезпеку травмування робітників, в першу чергу травмування очей.

Згадані «постріли» НРС з шпурів призводять до втрати певного об'єму суміші потребують додаткового зарядження шпурів, що негативно впливає на собівартість

отриманої продукції; «постріли» НРС з шпурів також являють собою екологічну проблему із-за додаткового впливу хімічних реагентів на оточуюче середовище.

Подальший розвиток методів інтенсифікації технології використання НРС передбачав герметичне запирання НРС в шпурах, що дало змогу підвищити тиск, який розвиває НРС в процесі кристалізації. Наступним етапом інтенсифікації технології став метод запирання та попереднього стискання НРС в шпурах до початку реакції кристалізації, що забезпечило подальше зростання тиску в шпурах. Ці методи були описані в роботах [97 - 99].

Герметичне запирання НРС в шпурі спочатку здійснювалося за рахунок шпильки з двома нерухомими шайбами, діаметр яких дорівнював діаметру шпура. Така конструкція пристрою дозволила підвищити тиск в шпурі, однак для отримання тріщини розколу в одному напрямку в усіх шпурах, треба було забезпечити накладання епюр розтягуючих напружень в наступних шпурах одна на одну.

В наш час конструкторські та пошукові роботи в напрямку вдосконалення технологій використання НРС активно проводить Шуляк Я.О, що набуло відображення в роботах [100-103].

1.3. Мета і задачі досліджень

Проведені в 2012-2016 роках в НТУУ «КПІ» пошукові та проектно-конструкторські роботи по удосконаленню технології використання НРС для видобутку гранітних блоків довели можливість розробки обладнання та технології його використання, які забезпечують керування тріщиноутворенням у заданому напрямку.

Накопичений багаторічний досвід використання НРС для видобутку природнього каменю засвідчив, що більшість дослідників вивчали методи та засоби підвищення тиску, який можна отримати в результаті реакції кристалізації НРС.

Слід зазначити, що в більшості робіт зовсім не аналізувався вплив властивостей природнього каменю на формування тріщини розколу у заданому

напрямку. Напряг розколу задавався тільки за рахунок розташування шпурів з НРС, що гарантувало виникнення розтягуючих напружень сусідніх шпурів спільних зон навантаження. У випадку навіть незначного збільшення відстані між шпурами і відсутності спільних зон навантаження, тріщиноутворення у заданому напрямку було проблематичним.

Враховуючи, що всі породи мають анізотропні властивості, а використання пластин-вставок забезпечує симетричну нерівномірність навантаження стінки шпура, виникла необхідність розробки методики керування, напрямом тріщиноутворення.

Аналіз відомих досліджень [1, 84, 37] по керуванню напрямком тріщиноутворення в кам'яних породах при використанні НРС, а також з урахуванням властивостей породи дає можливість зробити висновок, що є необхідність наукового обґрунтування та розробки методики керування напрямком тріщино утворення при видобутку блоків.

Метою роботи є теоретичне і експериментальне обґрунтування раціональних технологічних параметрів видобутку кам'яних блоків шпуровим методом шляхом утворення в анізотропній породі тріщини відриву заданого напрямку з допомогою НРС і керуючої пластини – вставки.

Відповідно до поставленої мети поставлені наступні задачі досліджень:

- вибір і обґрунтування теоретичної моделі гірської породи з визначенням параметрів напруженого стану навколо шпура при дії НРС в залежності від товщини керуючої пластини – вставки та її орієнтації відносно більшої осі анізотропії породи;
- дослідження закономірностей розвитку в процесі кристалізації НРС головних розтягуючих напружень з урахуванням анізотропії природного каменю для керування напрямком тріщиноутворення;
- розробка методичних рекомендацій та технологічних параметрів застосування шпурової системи з агрегатом на основі пластини – вставки і впровадження у виробництво комплексу обладнання для керованого формування тріщини відриву в анізотропному скельному масиві.

РОЗДІЛ II

ТЕОРЕТИЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ КЕРОВАНОГО ТРИЩИНОУТВОРЕННЯ ПРИ ВИКОРИСТАННІ НРС

2.1. Поле напружень в зоні дії шпура з НРС в присутності керуючої пластини – вставки

Для керування напрямом розколу гірської породи в циліндричних шпурах з пластиною – вставкою необхідно дослідити напружено – деформований стан каменю навколо шпура, який піддається внутрішньому нерівномірно розподіленому тиску від НРС по двох дугах в отворі шпуру. Розподіл тиску залежить від розмірів дуг, які змінюються залежно від товщини пластини – вставки (рис. 2.1). Саме тиск тріщиноутворення дозволяє сформулювати вимоги до потенційних можливостей технологічного обладнання.

Слід відзначити, що методики розрахунку тиску тріщиноутворення в шпурах для різних порід є необхідним етапом в створенні нових технологій використання НРС.

При використанні НРС тиск виникає за рахунок кристалізації суміші, що заливається у дві порожнини шпуру між пластиною – вставкою (рис. 2.1).

Тиск від НРС діє по нормалі до стінки шпуру, тому для шпуру без пластини – вставки в ізотропній породі його можна розкласти на дві складові, що діють по осях X та Y (2.1).

$$p = \sqrt{p_x^2 + p_y^2} \quad (2.1)$$

За рахунок p_x виникають напруження σ_y та за рахунок p_y напруження σ_x . Враховуючи, що камінь – крихкий матеріал, то при використанні першого критерію міцності для визначенні напружень тріщиноутворення нас цікавлять тільки максимальні напруження на розтягнення $[\sigma_p]$ [117]

$$\sigma \geq [\sigma_p]. \quad (2.2)$$

В цьому випадку напрямок тріщини відколу буде невизначеним.

Проведемо дослідження впливу пластини – вставки в шпурі з НРС на напружений стан навколо шпура, що дозволить визначити напрямок розколу каменю.

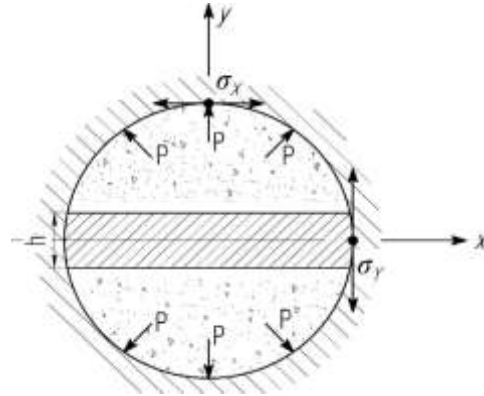


Рис. 2.1. Розподіл тиску в шпурі з пластиною – вставкою

Присутність пластини – вставки змінює навантаження на крайок шпуру і граничні умови на дугах контуру шпуру можна представити у вигляді:

$$\begin{aligned} - P(h) &= s_x \cos^2 q + s_y \sin^2 q + t_{yx} \sin 2q, \\ 0 &= (s_y - s_x) \sin q \cos q + t_{xy} \cos 2q, \end{aligned}$$

$$\text{де } P(h) = A(\pi R^2 - h\sqrt{4R^2 - h^2}), \quad (2.3)$$

тут A – питомий тиск від НРС в шпурі без пластини – вставки – МПа/мм² [1],
 R – радіус шпуру – мм, h – товщина пластини – вставки – мм.

Мета теоретичних досліджень – отримати епюри розподілу напружень по нормальному перерізу шпура з пластиною-вставкою, а також дослідити зміни розподілу напружень в залежності від товщини пластини-вставки при різних фізико-механічних властивостях природного каменю, таких як модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, границі міцності на стискання і границі міцності на розтягнення; обґрунтувати вибір оптимального діапазону товщин пластини-вставки

в залежності від відношення напружень $\frac{\sigma_x}{\sigma_y}$ при максимальному тиску P в шпурі.

Проблема, що виникає під час видобування блоків природного облицювального каменю, є потреба знижувати витрати та збільшувати вихід блокової продукції на всіх стадіях видобувних робіт від розкриття родовища до відколу кондиційних блоків. При видобутку блочного каменю часто використовують шпуровий метод. При ощадному режимі буріння шпурів, розміри утворених мікротріщин дуже незначні в порівнянні з поперечними перетинами шпурів, а кристали, з яких складається грська порода, розташовані хаотично, тому при постановці задач про дослідження напружено – деформованого стану навколо шпурів з пластинами – вставками використана модель ізотропного суцільного середовища. Фізико – механічні властивості таких середовищ визначаються наступними величинами: модуль пружності, коефіцієнт Пуассона, опір стисканню, опір розтягненню, опір зрізу та інші [117].

Україна – одна з небагатьох країн світу, де за наявності кристалічного щита розташовані багаті та унікальні родовища природного декоративного каменю – гранітів, габро, лабрадоритів та інших, які широко застосовуються в різних галузях будівництва та архітектури. [27]. Тому, було досліджено технологію видобутку кам'яних блоків з допомогою пластин – вставок при дії НРС на гірські породи, які наведені (табл. 2.1).

Оскільки скельні породи мають межу міцності на стискання $[\sigma_c]$ і межу міцності на розтягнення $[\sigma_p]$, то можна наближено в плоскому випадку побудувати ізолінії руйнування породи в точці у вигляді еліпсів:

$$\frac{\sigma_x^2}{[\sigma_p]^2} + \frac{\sigma_y^2}{[\sigma_c]^2} = 1. \quad (2.4)$$

Оскільки в формулу (2.4) входять напруження σ_x і σ_y , то необхідно визначити їх розподіл навколо шпура з пластиною-вставкою при дії НРС щоб визначити найбільш вигідний напрямок розколу каменю.

Обрані для розрахунку породи та їх механічні властивості

п/п	Гірська порода	Модуль Пружності Е,МПа	Коеф. Пуасона, в.о.	Межа міцності на розтягнення [σ_p],МПа	Межа міцності на стискання [σ_c],МПа	Питома Вага Т/м ³
1	Діабаз	93800	0,27	11	157	2,87
2	Лабрадорит	90000	0,33	20	200	2,76
3	Порфірит	88500	0,31	20	160	2,93
4	Кварцовий порфір	70000	0,21	38	336	2,63
5	Граніт рожевий	57400	0,18	17	170	2,59
6	Мармур чорний	57400	0,32	21	75	2,82

Оскільки діаметри шпурів значно менші їх довжини, напружений стан біля них відповідає стану плоскої деформації. Проведені експерименти показують, що навколо шпурів утворюється деяка зона підвищених напружень – так звана зона «концентрації напружень». При відповідному навантаженні стінок шпурів за допомогою НРС в цій зоні, матеріал гірської породи не може бути пружним і перейде в стан, який назвемо «станом за межею пружності». Оскільки, природній камінь є крихким матеріалом, то вважаємо, що точка досягнення «стану за межею пружності» буде точкою зародження тріщини. Цей стан буде мати місце в деякій області біля шпуру. Напружений і деформований стан за межею пружності визначається співвідношеннями теорії пластичності. Зробимо припущення, що порода «пластичний» матеріал характеризується тим, що він не може сприймати напруження, що перевершують певну межу плинності. В даному випадку за “межу

плинності” будемо вважати межу міцності породи на розтягнення – $[\sigma_p]$. Для пластичних матеріалів існує цілком певна функція так звана умова пластичності або функція течії.

$$f(\sigma_{ij}) = 0 \quad (2.5)$$

При виконанні рівності (2.5) в даній точці тіла можуть виникати пластичні деформації (зародження тріщини). В пружній області $f(\sigma_{ij}) \leq 0$. Плоска задача теорії пластичності має наступну особливість [1]: три рівняння – два рівняння рівноваги

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0 \quad \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} = 0 \quad (2.6)$$

плюс умова пластичності (2.5) – відносно трьох компонентів напруження σ_x ; σ_y ; τ_{xy} визначають замкнуту систему рівнянь. Тому плоску задачу теорії пластичності часто називають «статично визначеною», маючи на увазі при цьому замкнутість системи рівнянь для напружень. Однак, до статично визначених задач можуть бути віднесені лише ті, граничні умови яких задані тільки в напруженнях (контур шпуру навантажений заданими зусиллями (2.3)). Для гірських порід умову пластичності можна записати у вигляді [120]

$$f(\sum_2, \sum_3) = 0, \quad (2.7)$$

де \sum_2, \sum_3 – відповідно другий і третій інваріанти девіатора напружень (у металів і гірських порід об'ємна деформація в достатніх межах є пружною, тому умова пластичності (2.5) не залежить від першого інваріанта тензора напружень σ).

Якщо для плоскої деформації, в умовах якої знаходяться шпури, з умови $\varepsilon_z = 0$ слідує

$$\sigma_z = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y), \quad (2.8)$$

то третій інваріант девіатора напружень \sum_3 дорівнює нулю і умова пластичності (2.5) зводиться до вигляду

$$(\sigma_x - \sigma_y)^2 + 4\tau_{xy}^2 = 4k^2, \quad (2.9)$$

Якщо в (2.9) покласти $k = [\sigma_p]/2$, то отримаємо третю умову міцності, яка визначає зону зародження тріщини.

Умова пластичності (2.9) і рівняння рівноваги (2.6) складають замкнену систему рівнянь плоскої задачі теорії пластичності відносно трьох компонент напружень σ_x ; σ_y ; τ_{xy} .

При рішенні статично визначених пружно-пластичних задач, можна обмежитися припущенням про нестисливість матеріалу, необхідним при визначенні переміщень. Як показують рішення задач, це припущення про нестисливість матеріалу всюди в пружній і пластичній зонах істотно впливає лише на величину компоненти σ_z , однак знання останньої зазвичай не представляє інтересу.

При вирішенні пружно-пластичних задач концентрації напружень біля отворів визначено таку область можливої зміни зовнішніх навантажень, щоб при навантаженні в пластичних областях не виникали зони розвантаження. При розвантаженні використання умови (2.9) стає незаконним.

Розрахунок технологічних параметрів робіт для відколу кам'яного блоку визначається фізико-механічними властивостями порід, діаметрами шпурів, відстанями між шпурами, а також типом навантаження, яке створюється НРС. При навантаженні стінок шпурів з пластинами-вставками статичними зусиллями НРС для відділення блоків не виникають зони розвантаження, тому при вирішенні конкретних задач використано умову пластичності (2.9).

Постановка задачі. Для керування напрямом розколу породи в шпурах необхідно дослідити напружено-деформований стан, який піддається внутрішньому тиску, розподіленому по дугах в отворі шпура (рис 2.1).

В зв'язку з тим, що діаметр шпура набагато менший за його довжину, то при дії НРС з пластиною – вставкою створюються умови плоскої деформації. Оскільки розподіл деформацій навколо шпура при плоскій деформації відрізняється лише константами від подібної задачі для плоского напруженого стану, то математичне моделювання розподілу напружень навколо шпура від дії НРС можна провести на

пластинах з отвором, до контуру якого прикладені напруження від дії НРС при наявності пластини- вставки (2.3). Пластини вирізаються перпендикулярно до вісі шпура.

Для математичного моделювання була вибрана пластина з гірської породи товщиною 10мм і з отвором діаметром 40мм. Ширина та висота пластини в 10 разів більші за діаметр отвору і дорівнюють 400 мм, що дозволяє уникнути впливу крайових ефектів (рис. 2.2).

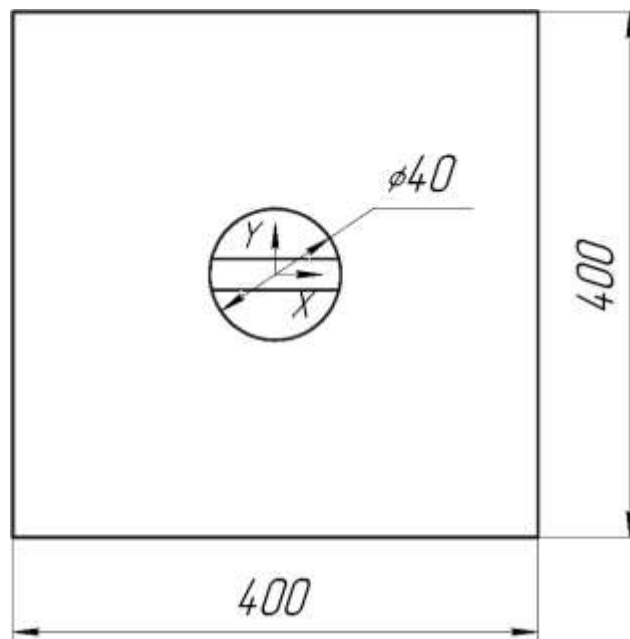


Рис. 2.2. Геометричні розміри пластини.

Граничні умови на контурі шпура з пластиною – вставкою визначаються формулами (2.3), краї пластини жорстко защемлені:

$$u_x = u_y = 0, \quad (2.10)$$

де u_x - переміщення точок пластини вздовж осі x , u_y - переміщення точок пластини вздовж осі y .

Отже маємо третю крайову задачу плоского напруженого стану, коли на кромці шпура задані силові умови, а на краях пластини задані переміщення. Вважаємо, що краї пластини жорстко закріплені а пластина – вставка абсолютно жорстка.

Поставлену вище задачу розв'язано методом скіченних елементів. Для постановки крайової задачі пружності припустимо, що в початковий момент t_0 в розглядуваному тілі переміщення $U_{ij}(\vec{x}, t_0)$, деформації $\varepsilon_{ij}(\vec{x}, t_0)$, напруження $\sigma_{mn}(\vec{x}, t_0)$ мають нульові значення. Нехай після цього в об'ємі тіла Ω , а також на частині його поверхні $S_G = S_U \cup S_P$ за деякий проміжок часу відбудеться зміна навантажень, тобто на час t прикладемо: $P_m(\vec{x}, t)$ – поверхневі сили на S_P ; встановилися переміщення $U_i(\vec{x}, t)$ – на S_U . Тоді для визначення в кожній точці (її однорідного околу) величин: $U_i(\vec{x}, t)$ – переміщень, $\varepsilon_{ij}(\vec{x}, t)$ – деформацій, $\sigma_{mn}(\vec{x}, t)$ – напружень – маємо наступну крайову задачу в “фізичній” системі координат):

Для цього визначальні рівняння запишемо у тензорному вигляді, які є більш алгоритмічними:

– рівняння рівноваги, як окремий випадок рівняння руху, в узагальненому записі має вигляд: (рівняння еквівалентне рівнянням (2.6):

$$\nabla^n \sigma_{mn} = 0; \quad (2.11)$$

– геометричні (рівняння Коші для малих деформацій), в узагальненому вигляді:

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{2} (\nabla^i U_j + \nabla^j U_i), \quad (2.12)$$

– фізичні рівняння – узагальнений закон Гука

$$\varepsilon_{ij} = C_{ijmn} \sigma_{mn}; \quad (2.13)$$

де: C_{ijmn} - матриця модулів пружності

Додатково залучаються граничні умови: (2.3), (2.10)

Для реалізації поставленої крайової задачі зручно використати її варіаційний аналог.

Для виконання варіаційної постановки задачі використовуються співвідношення (2.3), (2.9) – (2.13), властивості симетрії тензора напружень $\sigma_{mn} = \sigma_{nm}$ і теорема Гауса –Остроградського.

В підсумку можна отримати наступний функціонал відносно варіацій напружень, переміщень і зв'язаних із ними деформацій

$$F = \int_{\Omega} \sigma_{mn} \delta \varepsilon_{mn} d\Omega - \int_{S_p} P_m \delta U_m dS = 0, \quad (2.14)$$

що в поєднанні з граничними силовими умовами (2.3) на кромці шпура і кінематичними на краях пластини (2.10) визначає незліченну множину можливих (віртуальних) напружено-деформованих станів. Дійсний НДС є одним з віртуальних, але він додатково задовольняє граничні умови (2.3), (2.10) і рівнянням рівноваги (2.11).

Для розв'язання крайової задачі узагальнений лінійний закон Гука запишемо у вигляді

$$\{\sigma\} = [D]\{\varepsilon^e\}, \quad (2.15)$$

де $[D]$ – матриця модулів пружності.

У випадку пружної ізотропії матеріалу матриця

$$[D] = 2G \cdot \begin{pmatrix} a & b & b & 0 & 0 & 0 \\ b & a & b & 0 & 0 & 0 \\ b & b & a & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & c & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & c & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & c \end{pmatrix} \quad (2.16)$$

де $2G = E/(1 + \mu)$; $a = (1 - \mu)/(1 - 2\mu)$; $b = \mu/(1 - 2\mu)$; $c = 0,5$;

E – модуль Юнга; μ – коефіцієнт Пуассона.

Запишемо закон Гука у вигляді:

$$\begin{aligned} \{\sigma\} &= [D]\{\varepsilon\} \text{ або} \\ \{\sigma\} &= [D][[B]\{q\}_e], \end{aligned} \quad (2.17)$$

$$\{\varepsilon\} = [B]\{q\}_e, \quad (2.18)$$

де

де $\{q\}_e = \{(q^1, q^2, q^3)_1, \dots, (q^1, q^2, q^3)_M\}^T = \{q_1, q_2, \dots, q_{3M}\}^T$ – вектор переміщень у

вузлах скінчених елементів (СЕ); $[B]$ – матриця диференціювання за глобальними координатами, пов'язана лише з типом СЕ і системою глобальних координат X, Y .

Схему розбивки на СЕ площини породної пластини з керуючою металевою вставкою в отворі представлено на (рис. 2.3).

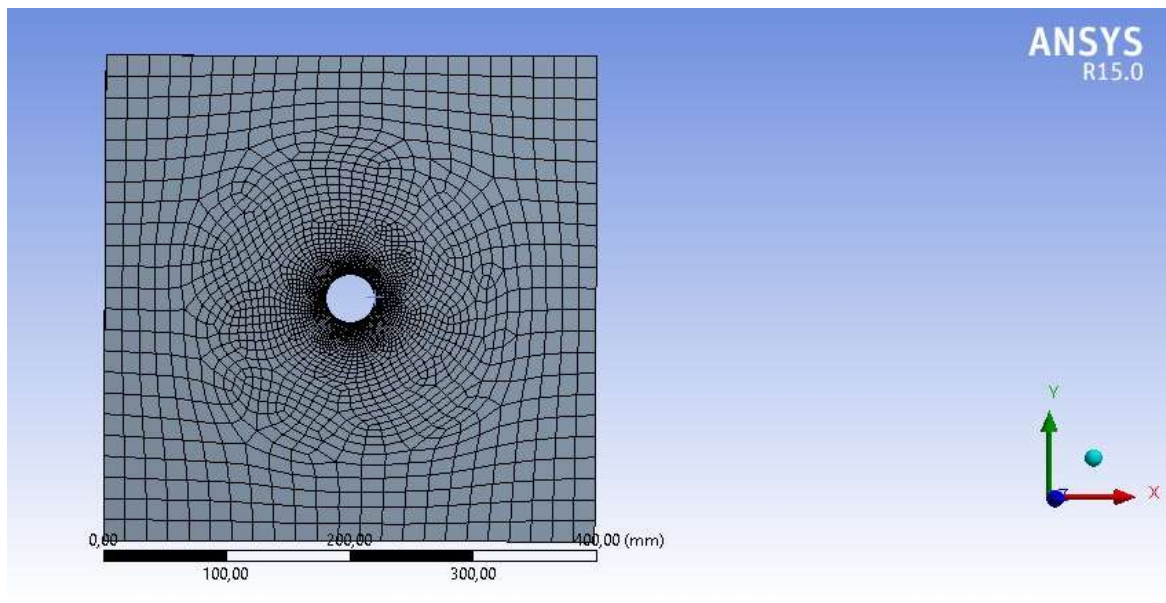


Рис. 2.3 Пластина та розбита на ній сітка скінчених елементів.

Функціонал (2.14) з урахуванням можливості суперпозиції робіт по СЕ, зумовленої тим, що СЕ взаємодіють один з одним у вузлах і не перетинаються, записується так:

$$F = \sum_e \int_{\Omega^e} [B]^T \{\delta q\}_e^T ([D][B]\{q\}_e) d\Omega - \sum_e \int_{S_p^e} [\phi]^T \{\delta q\}_e^T \{p\} dS = 0, \quad (2.19)$$

де позначено вектори навантажень $\{p\} = \{p_1, p_2, p_3\}^T$; S_p^e – сторона СЕ, що виходить на кромку шрура; знак \sum_e означає додавання по всіх СЕ, що містять розглядуваний ступінь волі вузла.

Оскільки в підінтегральних виразах є вектори $\{\delta q\}_e^T$ і $\{q\}_e$, що не залежать від

параметрів інтегрування, то їх можна винести за межі інтегралів. Згрупувавши інтеграли в (2.19), отримаємо:

$$F = \sum_e \{\delta q\}_e^T \int_{\Omega^e} [B]^T [D][B] d\Omega \cdot \{q\}_e + \sum_e \{\delta q\}_e^T \left(\int_{S_p^e} [\underline{g}]^T \{p\} dS \right) = 0 \quad (2.20)$$

Позначимо:

$$[K]_e = \int_{\Omega^e} [B]^T [D][B] d\Omega \quad (2.21)$$

$$\{P\}_e = \int_{S_p^e} [\phi]^T \{p\} dS \quad (2.22)$$

Тоді

$$F = \sum_e \{\delta q\}_e^T ([K]_e \{q\}_e - \{P\}_e) = 0 \quad (2.23)$$

Оскільки $\{\delta q\}_e^T$ - довільний, то отримаємо САР вигляду:

$$[K]\{q\} = \{P\} \quad (2.24)$$

відносно глобального вектора приростів дійсних переміщень $\{q\}_e$ у вузлах СЕ сітки. В (2.24) позначено додавання за ступенями вільності вузлів: $[K] = \sum_e [K]_e$;

$[P] = \sum_e [P]_e$. Вектор $\{P\}$ зумовлюється зовнішніми силовими навантаженнями.

2.2. Модельні дослідження напруженого стану навколо шпура із застосуванням програми “ANSYS”

Поставлена вище задача розв’язана методом скіченних елементів (Finite-discrete element method – FDEM). Середовищем для підготовки кінцево-елементних моделей конструкцій та відповідних крайових задач для подальшого їх розрахунку (Finite Element Modeling, преост-процессор), а також для перегляду і документування результатів розрахунків (Post-processing, пост-процесор). ANSYS Workbench є інтегруючою середовищем і програмною платформою для розробки

програмних продуктів ANSYS, Inc. ANSYS Workbench також використовується для адаптації вже існуючих розрахункових комплексів.

Ця програмна платформа дозволяє об'єднати графічний інтерфейс додатків, а також забезпечити роботу з базами даних цих програмних продуктів в рамках одного проекту. (рис. 2.4., рис.2.5).

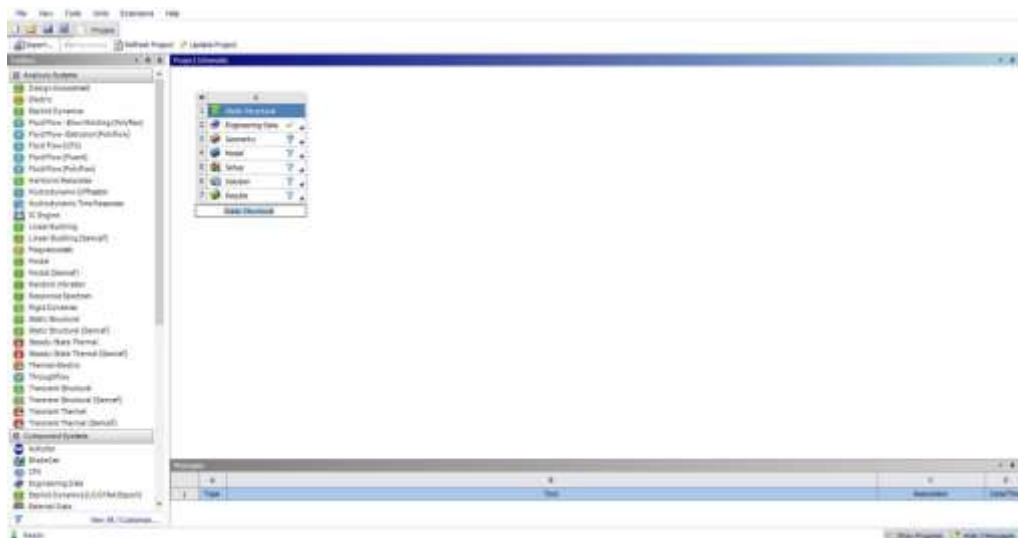


Рис. 2.4. Робоче поле Ansys Workbench 15.0

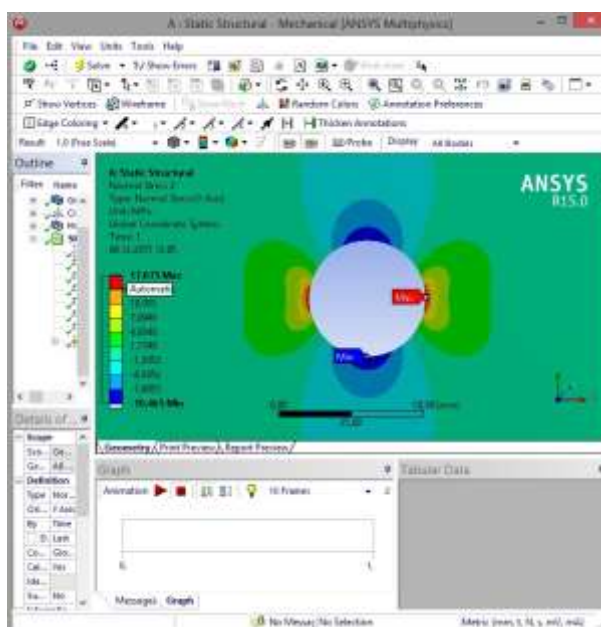


Рис. 2.5. Розрахунковий модуль

Повний цикл проведення аналізу напруженого стану породи навколо шпура складається з таких етапів:

- аналіз геометрії шпура та пристрою пластини – вставки, умов їх

навантаження, створення розрахункової моделі;

- використання механічних характеристик граніту;
- створення кінцево-елементної моделі граніту в районі шпура;
- постановка граничних умов;
- оскільки розглядаються статичні задачі, то початкові умови не потрібні;
- створення завдання на розрахунок;
- проведення розрахунку;
- візуалізація отриманих результатів та їх критичний аналіз.

Згідно формули (2.3) і наведених нижче літературних даних [2] про залежність зусилля НРС від діаметра шпура побудовано залежність тиску P від товщини пластини – вставки h для шпурів діаметром 40 мм (табл. 2.2).

Таблиця 2.2

Залежність тиску P від товщини пластини – вставки h для шпурів діаметром 40мм.

h мм	0	5	6	7	8
$PMПа$	40,0	38,4	38,1	37,8	37,52

Побудовано залежності, які відповідають сумісному розв'язку рівняння рівноваги (2.6) і умові пластичності (2.9) для різних порід і величин товщини пластини – вставки h . Визначити осі еліпсу (2.4) для різних порід згідно з табличними даними $[\sigma_p]$ і $[\sigma_c]$.

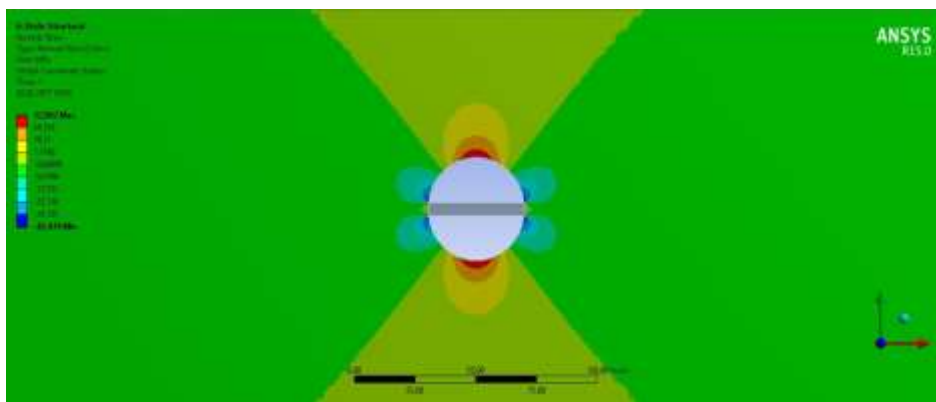


Рис. 2.6. Епюра розподілу нормальних напружень σ_x при товщині пластини – вставки 5 мм

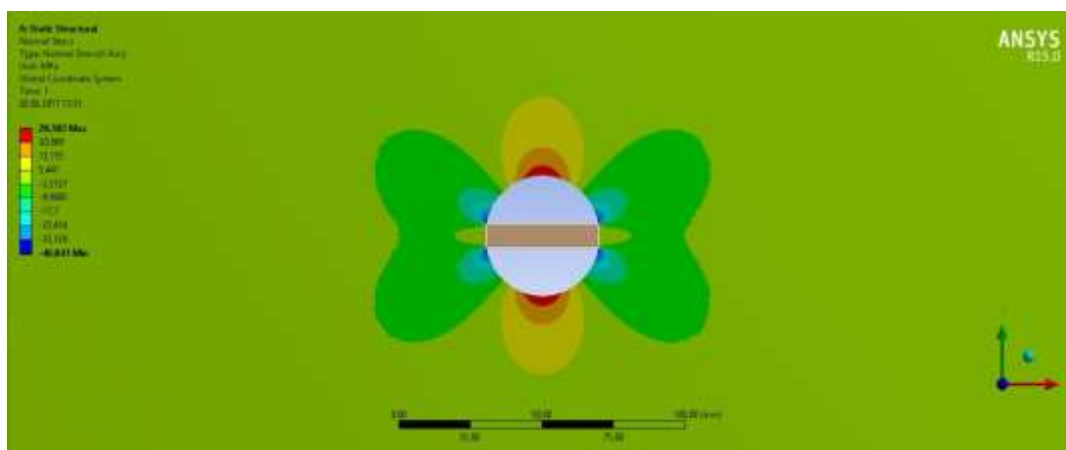


Рис. 2.7. Епюра розподілу нормальних напружень σ_x при товщині пластини – вставки 8 мм

Результати проведених теоретичних досліджень зведено до табл. 2.3, де відображено як фізичні властивості порід ($[\sigma_p]$ – межа міцності на розрив; E – модуль пружності; ν – коефіцієнт Пуассона), так і отримані характеристики напруженого стану та технологічні параметри (σ_y , σ_x , σ_x/σ_y , P , h) пов'язані, як з процесом тріщиноутворенням в шпурі, так і з можливістю керування напрямом розколу породи. Тиск P підбирався таким чином, щоб виконувалась умова тріщиноутворення [104-106]. Приклади розрахунків для кварцового порфіриту наведено на рис. 2.8...2.11.

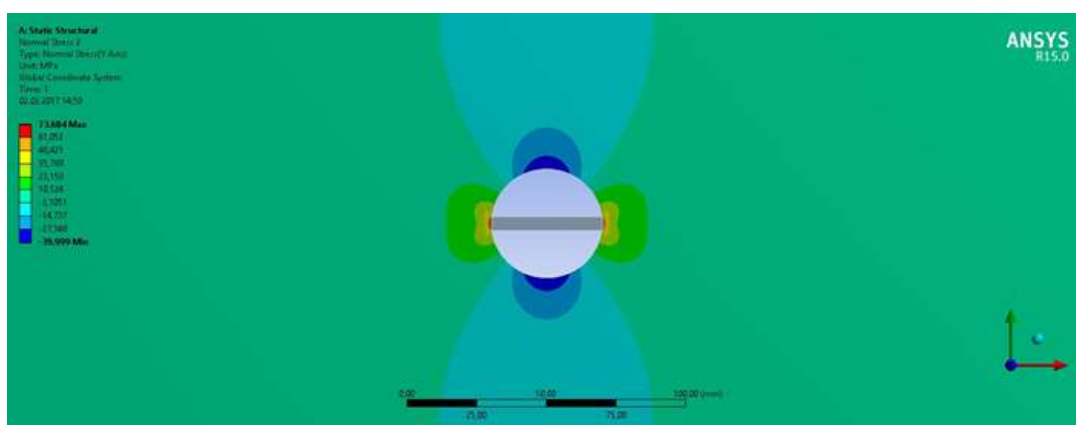


Рис. 2.8. Епюра розподілу нормальних напружень σ_y при товщині пластини – вставки 5 мм

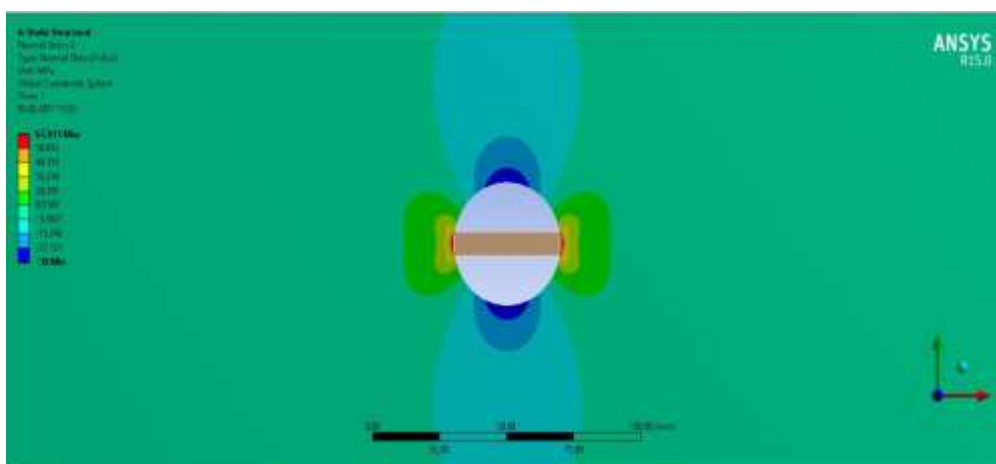


Рис. 2.9. Епюра розподілу нормальних напружень σ при товщині пластини – вставки 8 мм

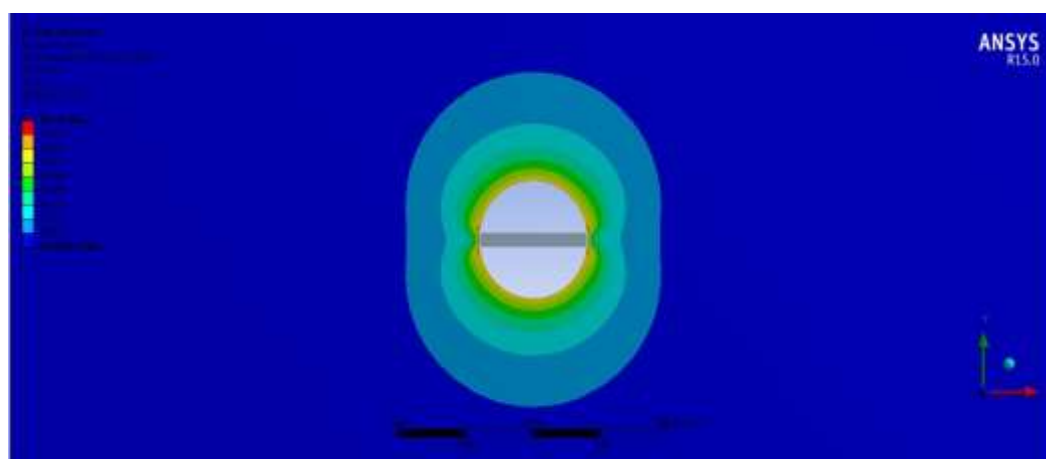


Рис. 2.10. Епюра еквівалентних напружень при товщині пластини-вставки 5 мм

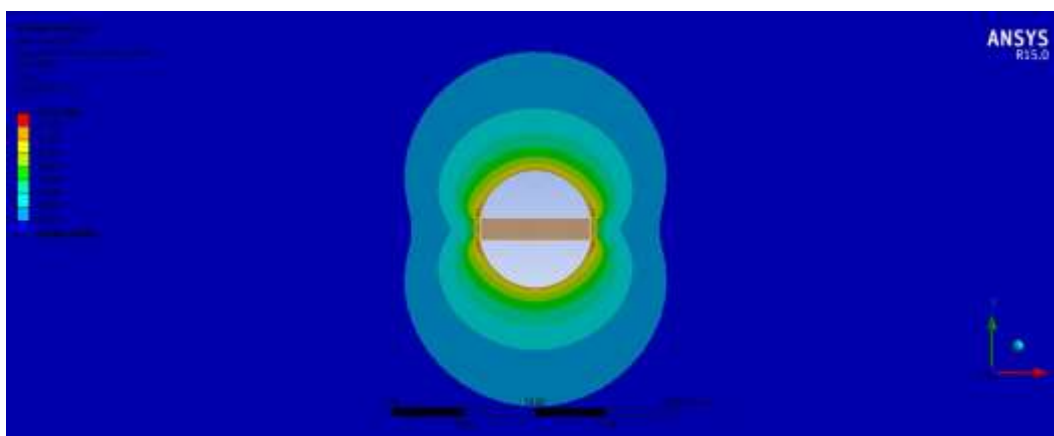


Рис. 2.11. Епюра еквівалентних напружень при товщині пластини-вставки 8 мм

Результати теоретичних досліджень.

Порода N	$[\sigma_p]$, МПа $\frac{[\sigma_p]}{[\sigma_c]}$, МПа	E, МПа	ν , Коеф Пуасс она	σ_y , МПа	h, мм	σ_x , МПа	$\frac{\sigma_x}{\sigma_y}$	P, МПа
N1 Кварцовий порфір	38 0,03	70000	0,21	38	5	25,5	0,67	19,8
					6	22,8	0,60	20,6
					8	15,4	0,40	23,3
N2 Мармур Чорний	21 0,28	57400	0,32	21	5	14,1	0,67	10,3
					6	12,6	0,60	11,0
					8	8,4	0,40	12,8
N3 Діабаз	11 0,07	93800	0,27	11	5	7,4	0,67	6,1
					6	6,6	0,60	6,3
					8	4,5	0,40	6,8
N4 Порфірит	20 0,125	88500	0,31	20	5	13,4	0,67	10,0
					6	12,0	0,60	10,5
					8	8,1	0,40	12,3
N5 Граніт Рожевий	17 0,1	57400	0,18	17	5	11,4	0,67	8,8
					6	10,2	0,60	9,1
					8	6,9	0,40	10,5

Отримані результати теоретичних досліджень дозволили побудувати залежності, представлені на (рис. 2.12 – 2.13).

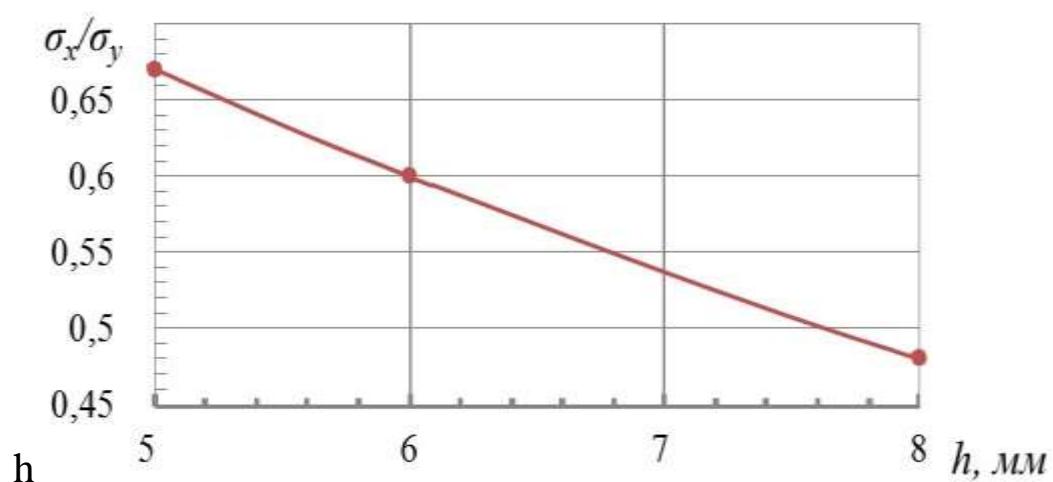


Рис. 2.12. Графік залежності відношення σ_x/σ_y від товщини пластин – вставок

Результати проведених розрахунків, представлені на рис. 2.12-2.13, дозволили зробити наступні висновки:

– співвідношення σ_x/σ_y показує різницю в розтягуючих напруженнях, які виникають по осях X та Y, а тому характеризують ступінь вірогідності отримання заданого напрямку тріщиноутворення;

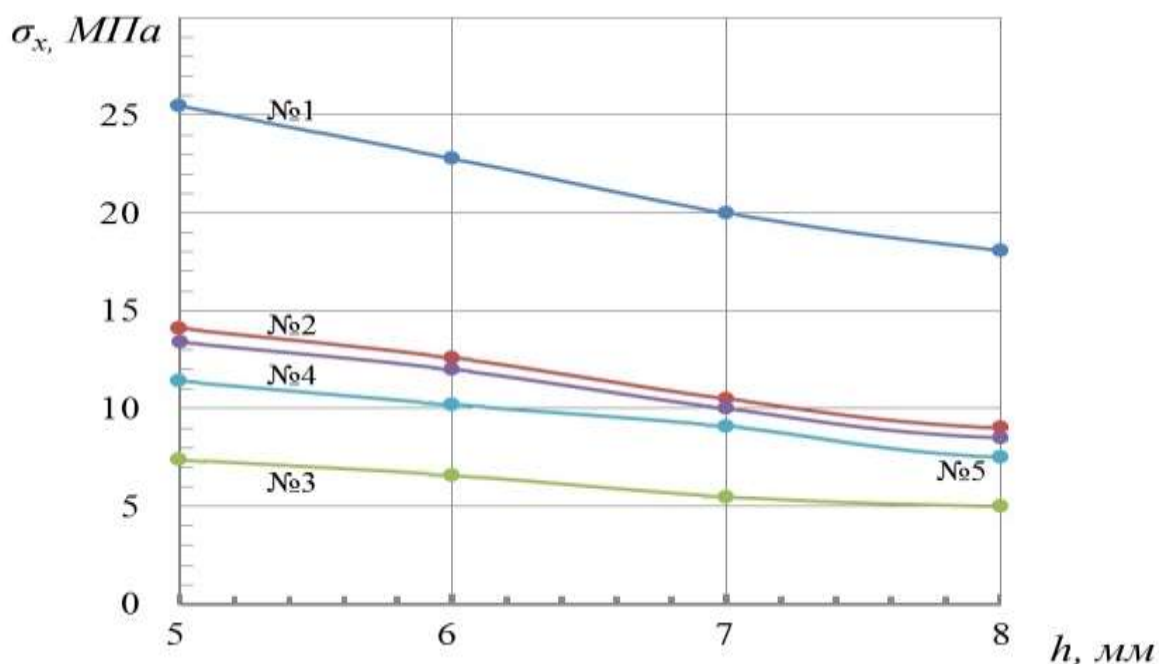


Рис. 2.13 – Графік залежності σ_x від товщини пластин – вставок h

– пластини з більшою товщиною (10-14 мм) (при діаметрі шпура 40 мм), забезпечують більшу вірогідність тріщиноутворення в заданому напрямку, але вони суттєво зменшують об'єм НРС в шпурі, що впливає на ширину отриманої тріщини розколу.

– залежність (- характеристика одна для різних порід при однакових товщинах пластин, що можна пояснити тим, що розподіл напружень мало залежить від модуля пружності та коефіцієнту Пуассона з розрахунків але залежить від товщини пластини. Доповнюючим фактором можна назвати те, що скельні породи мають

дуже малу зону плинності текучості, тобто графік напруження – деформація має майже лінійний характер до межі міцності.

2.3. Дослідження процесу керування напрямком тріщиноутворення

При проведенні дослідження були обрані наступні умови:

- максимальну межу міцності на стискання $[\sigma_c]$ з точки зору тріщиноутворення, має вісь Y де для тріщиноутворення по цій осі потрібно створити стискаючі напруження σ_x , які перевищать межу міцності – $[\sigma_c]$;

- мінімальну межу міцності на розтягнення $[\sigma_p]$ з точки зору тріщиноутворення, має вісь X , де для тріщиноутворення по цій вісі потрібно створити розтягуючі напруження σ_y , які перевищать межу міцності на розтягнення – $[\sigma_p]$;

- неоднорідністю граніту будемо вважати відношення мінімальної міцності породи граніту на розтяг $[\sigma_p]$ до максимальної міцності граніту на стискання $[\sigma_c]$ та обираємо діапазон зміни неоднорідності від 0,03 до 0,28 (табл. 2.1); іншими словами неоднорідність породи визначається відношенням меншої вісі еліпса (2.4) до більшої.

- для досліджень задаємося товщиною пластини-вставки 5, 6, 7 та 8 мм;

- виходячи з результатів аналітичних досліджень, наведених в розділі 2 (рис. 2.12), приймаємо, що діапазон співвідношення менших розтягуючих напружень до більших по осях шпура $\frac{\sigma_x}{\sigma_y}$, для заданих товщин пластин-вставок, дорівнює 0,48 – 0,65.

Наведені нижче дослідження процесу керування напрямком тріщиноутворення по осях неоднорідності X чи Y базуються на аналізі зміни в часі зростаючих розтягуючих напружень при кристалізації НРС по цим вісям з урахуванням заданого

діапазону неоднорідності кам'яної породи, орієнтації пластини-вставки по вісях шпура та заданого діапазону товщин пластин-вставок.

Картина формування розтягуючих напружень на вісях X та Y шпура, в залежності від орієнтації пластини-вставки, приведена на (рис. 2.14).

Отриманий напрямок тріщиноутворення буде залежати від того на якій вісі розтягуючі напруження σ_x або σ_y раніше досягнуть межі міцності породи на розтягнення $[\sigma_p]$. Іншими словами: отриманий напрямок тріщиноутворення буде залежати від орієнтації пластини вставки.

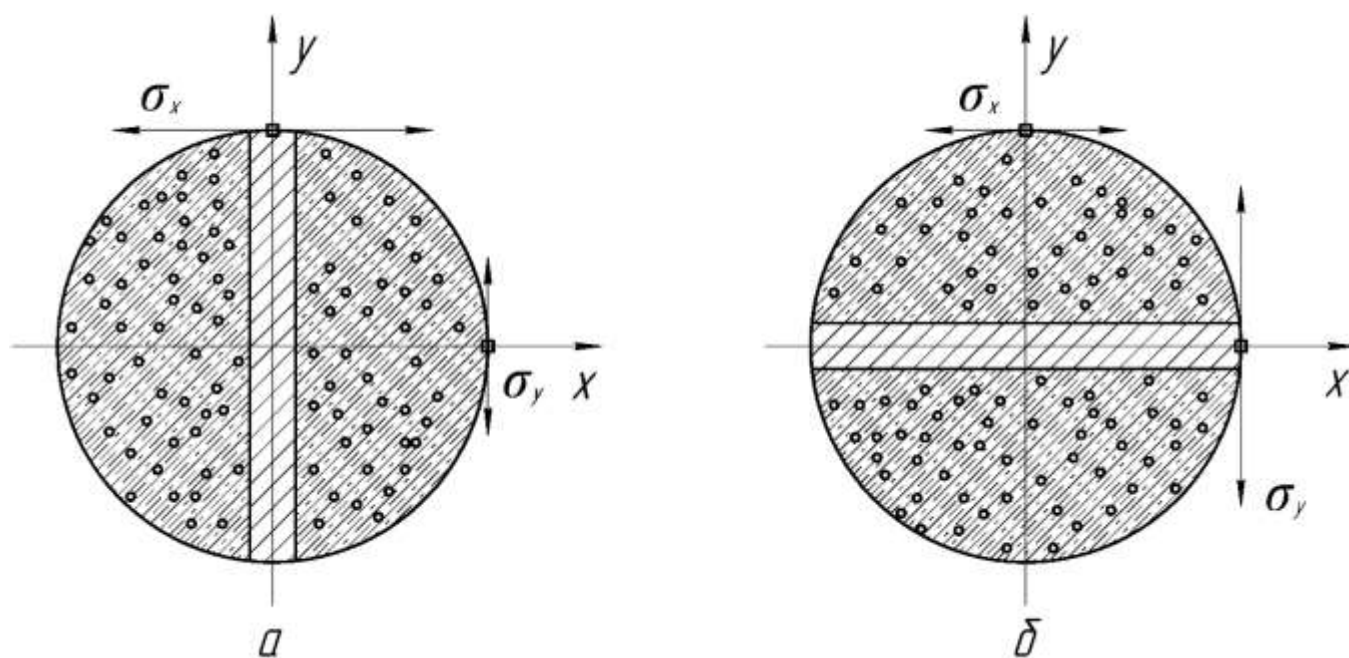


Рис. 2.14 Формування розтягуючих напружень на осях шпура в залежності від орієнтації пластини-вставки, де: а - пластина-вставка вздовж вісі Y ; б - пластина-вставка вздовж вісі X .

На рис. 2.14 (а) маємо $\sigma_x > \sigma_y$, а на рис. 2.14 (б) $\sigma_y > \sigma_x$.

Момент досягнення межі міцності породи на конкретній осі шпура буде залежати не лише від орієнтації пластини-вставки, але й від неоднорідності скельного масиву на сиск і на розтягнення та товщини пластини-вставки.

Процес взаємодії всіх перерахованих параметрів у часі при орієнтації пластини-вставки товщиною 5 мм вздовж осі Y неоднорідності породи яка характеризується відношенням $\frac{[\sigma_p]}{[\sigma_c]} = 0,28$ $\sigma_x / \sigma_y = 0,6$ представлена на (рис. 2.15).

При цьому потрібно враховувати, що при товщині пластини-вставки 5 мм співвідношення мінімальних розтягуючих напружень до максимальних дорівнює 0,67 (див. табл 2.3).

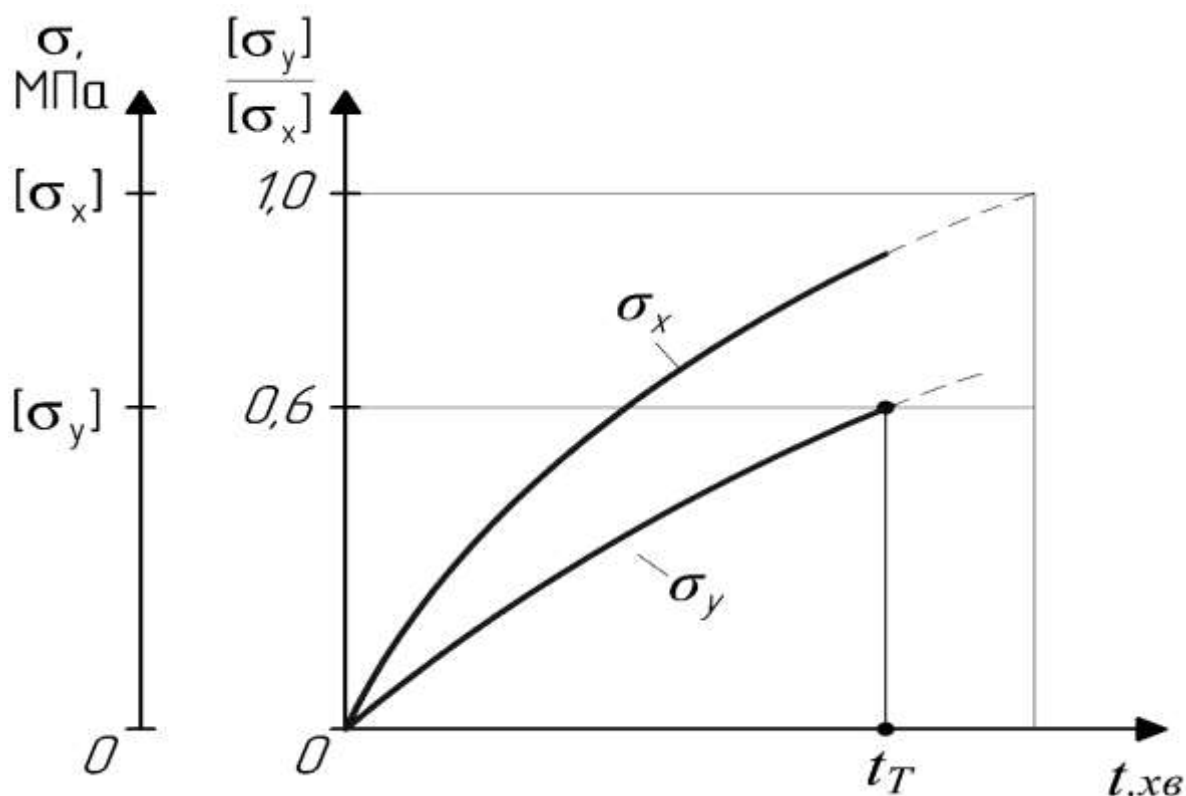


Рис. 2.15. Зростання в часові розтягуючих напружень σ_x і σ_y по осях неоднорідності породи в процесі кристалізації НРС

Як видно з кривих, представлених на рис. 2.15 першими досягають межі міцності розтягуючі напруження σ_y , які діють перпендикулярно вісі X . Таким чином, тріщиноутворення виникне по вісі X , яка має меншу міцність (час тріщиноутворення t_T).

Процес навантажень шпурі по осях породи X та Y при орієнтації пластини вставки товщиною 5 мм вздовж осі Y та неоднорідності породи $\sigma_x / \sigma_y = 0,65$

представлена на (рис. 2.16). При цьому потрібно враховувати, що при товщині пластини-вставки 5 мм співвідношення мінімальних розтягуючих напружень до максимальних дорівнює 0,67.

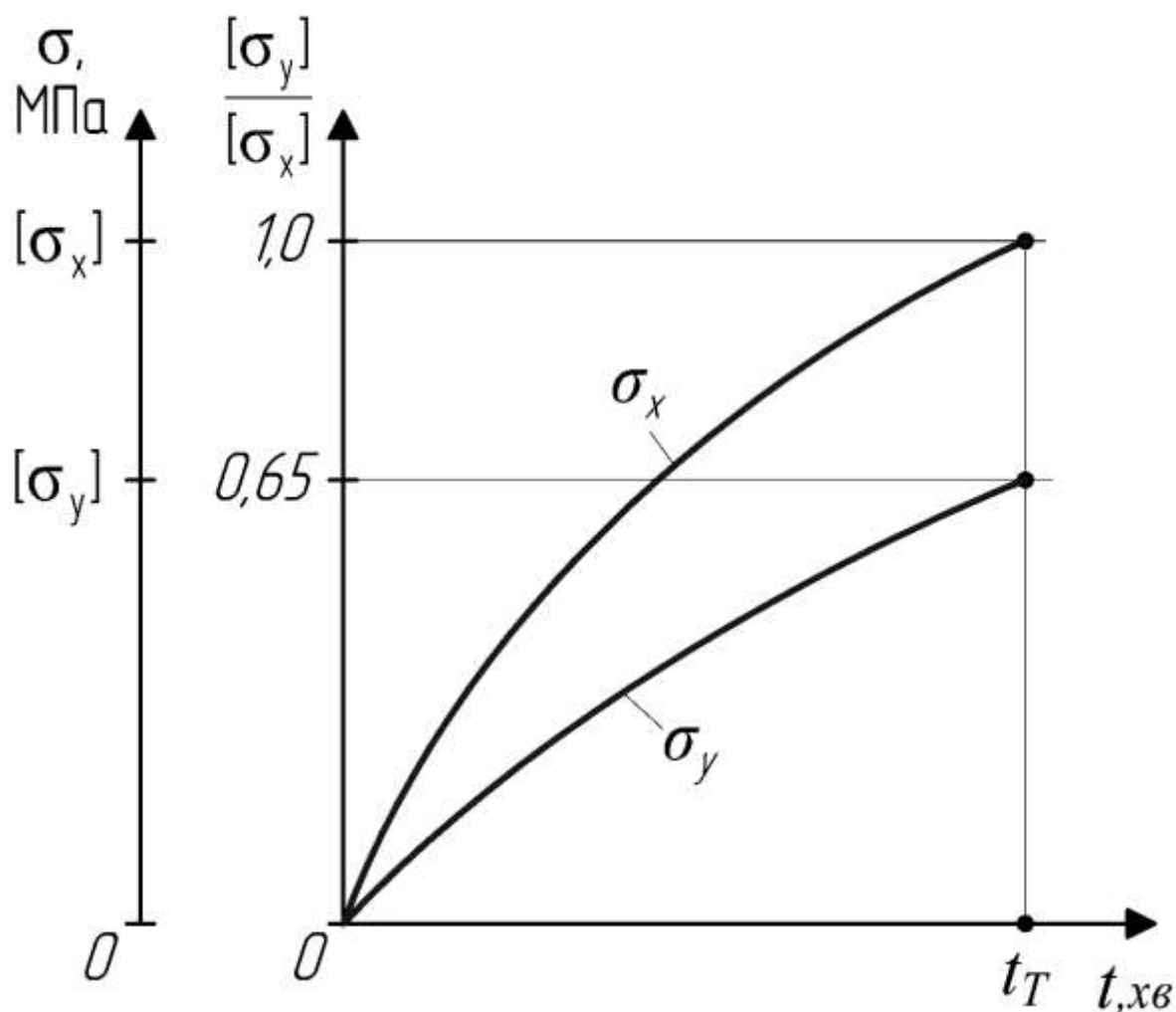


Рис. 2.16. Процес зростання в часові розтягуючих напружень по осях неоднорідності породи X та Y в процесі кристалізації НРС

Як видно з графіків, наведених на рис. 2.16 розтягуючі напруження σ_x та σ_y досягають меж міцності на вісях Y та X майже одночасно. У цьому випадку можна зробити висновок, що вірогідності тріщиноутворення, як по вісі X так і по вісі Y будуть практично однакові. Це означає, що при наведених початкових умовах керування напрямком тріщиноутворення відсутнє.

Процес навантажень шпурі по вісях неоднорідності граніту X та Y при орієнтації пластини вставки товщиною 6 мм вздовж вісі Y та неоднорідності граніту

0,6 представлена на (рис. 2.17). При цьому потрібно враховувати, що при товщині пластини-вставки 6 мм співвідношення мінімальних розтягуючих напружень до максимальних дорівнює 0,6.

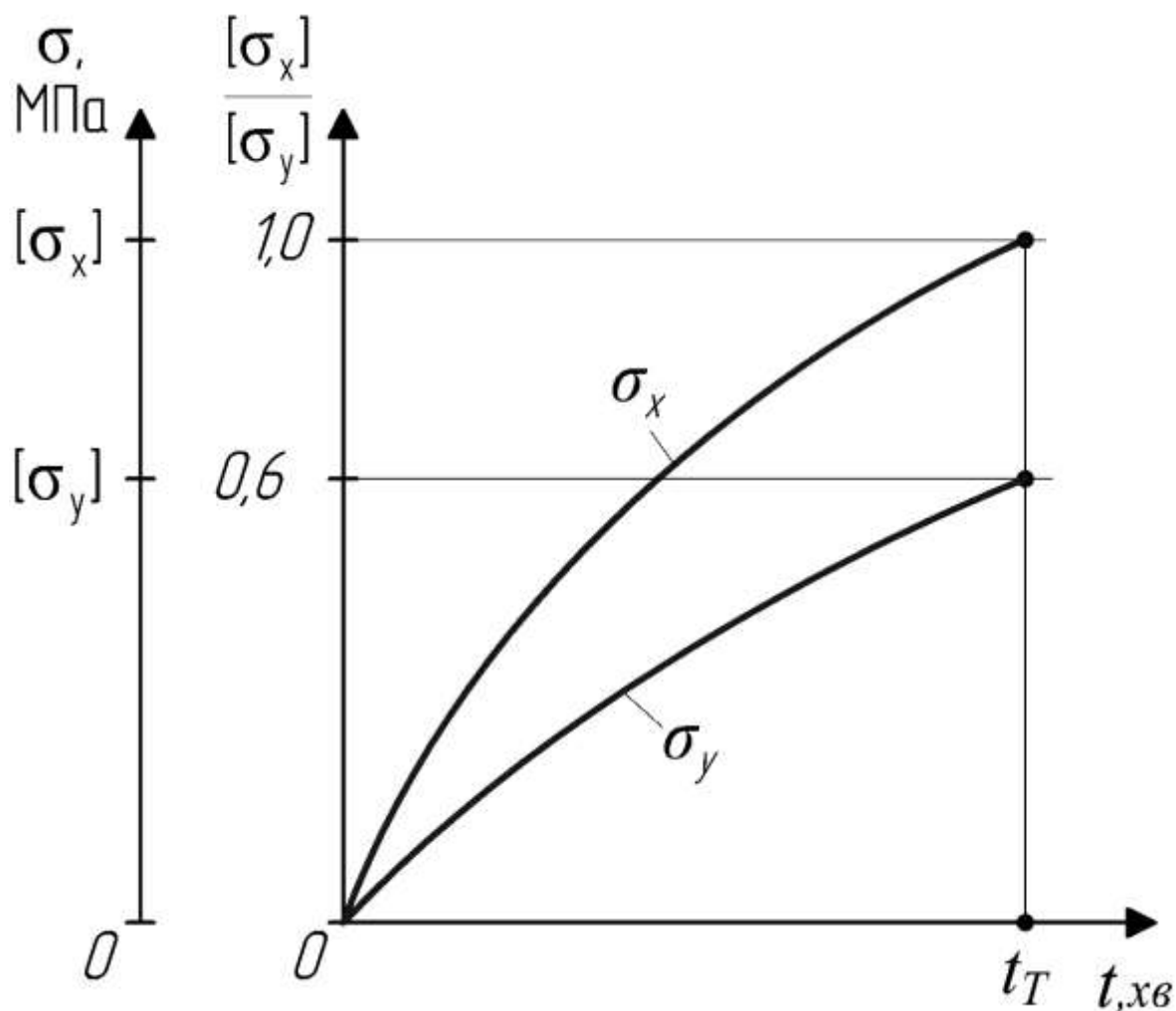


Рис. 2.17. Процес зростання в часові розтягуючих напружень по осях неоднорідності породи X та Y в процесі кристалізації НРС

Як видно з графіків, наведених на (рис. 2.17) динаміка зростання розтягуючих напружень по вісях неоднорідності X та Y повторює процес представлений на (рис. 2.16), тобто одночасно досягнення меж міцності породи на вісях X та Y виключає можливість керування напрямком тріщиноутворення.

Процес навантаження шпурі по вісях неоднорідності X та Y при орієнтації пластин-вставок товщиною 7 та 8 мм по вісі Y та неоднорідності породи 0,6

представлена на (рис.2.18). При цьому потрібно враховувати, що для пластин-вставок товщиною 7 та 8 мм співвідношення мінімальних розтягуючих напружень до максимальних дорівнюють 0,54 та 0,48 відповідно.

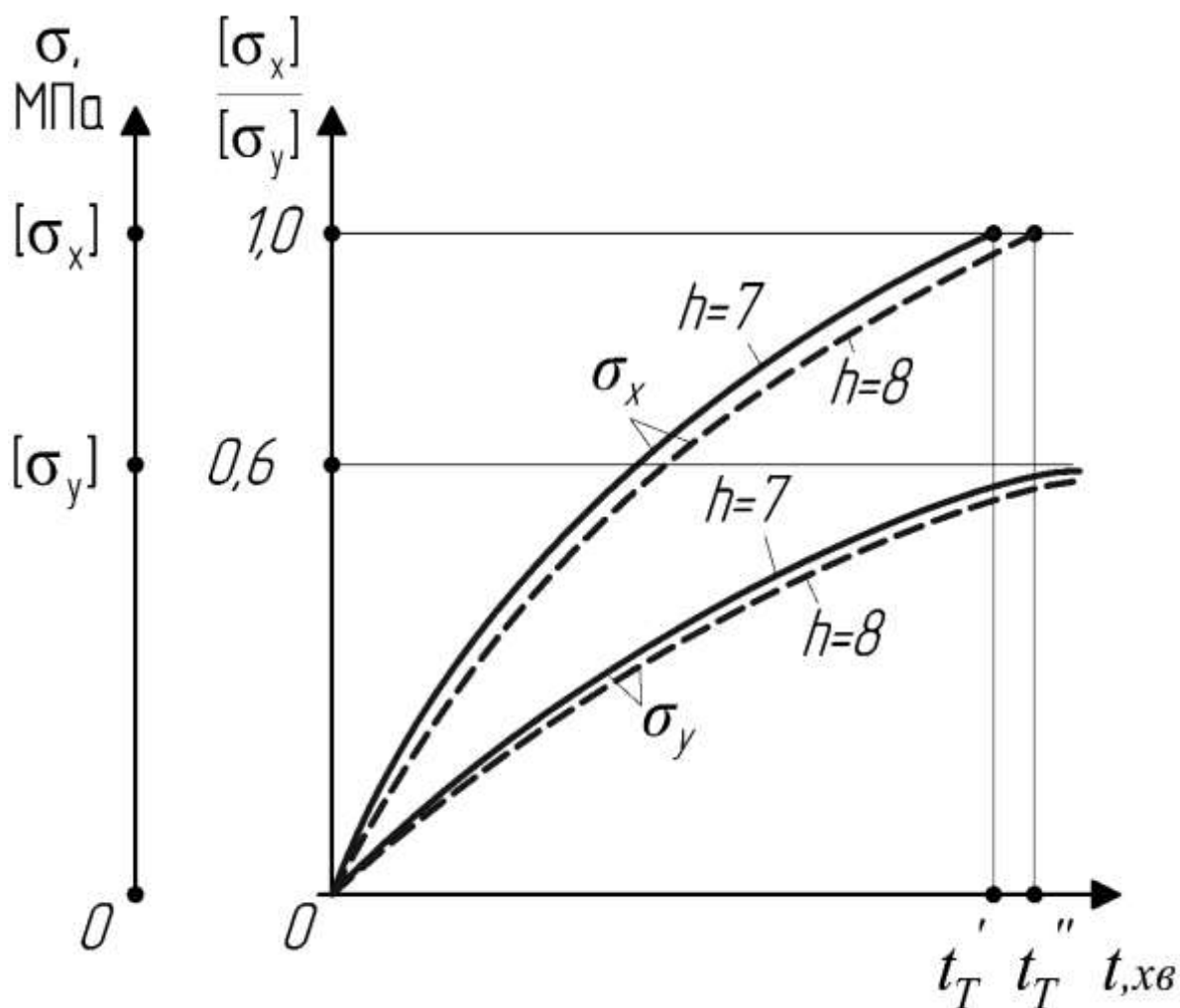


Рис. 2.18. Процес зростання в часові розтягуючих напружень по осях неоднорідності X та Y в процесі кристалізації НРС

Графіки наведені на (рис. 2.18) свідчать про те, що використання пластин-вставок товщиною 7 та 8 мм забезпечує тріщиноутворення по вісі з більшою міцністю Y ($\sigma_x = [\sigma_p]$). В залежності від товщини пластини – вставки час тріщиноутворення t_T' або t_T'' відповідно.

При наведених умовах кристалізації НРС збільшення анізотропії породи не може змінити напрямок тріщиноутворення.

Процес навантаження шпуру по осях неоднорідності X та Y при орієнтації пластин-вставок товщиною 5 та 8 мм по вісі X та неоднорідності породи 0,6 представлена на (рис.2.19).

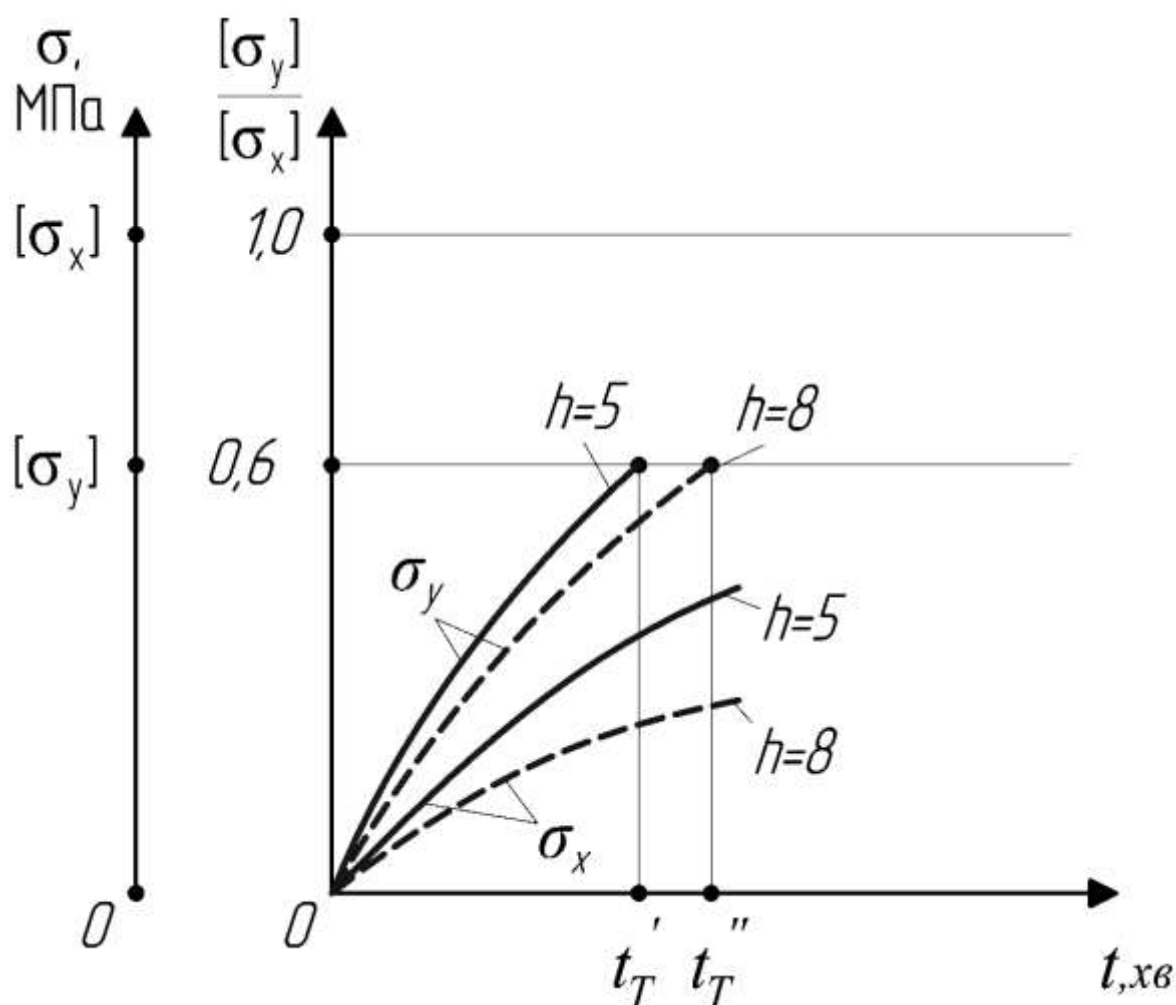


Рис. 2.19. Процес зростання розтягуючих напружень на осях неоднорідності X та Y в процесі кристалізації НРС

З графіків, наведених на (рис. 2.19), можна зробити висновок, що для заданих початкових умов (товщина пластин-вставок змінюється в діапазоні 5...8 мм, неоднорідності породи 0,6 та вище, орієнтація пластин-вставок по осі X), тріщиноутворення завжди буде проходити тільки по вісі X , по напрямку якої порода має меншу міцність ($\sigma_x = [\sigma_p]$). Проведені аналітичні дослідження процесу керування напрямом тріщиноутворення по осях неоднорідності X та Y дозволяють сформулювати наступні висновки:

– при орієнтації пластини-вставки товщиною 5 мм вздовж вісі анізотропії з максимальною міцністю Y і анізотропією породи 0,6 розтягуючі напруження на вісях анізотропії раніше досягають межі міцності $[\sigma_p]$, на вісі анізотропії X з меншою міцністю, що забезпечує тріщиноутворення по цій вісі;

– при орієнтації пластин-вставок товщиною 5 мм вздовж вісі анізотропії з максимальною міцністю на відрив і неоднорідністю породи 0,65, а також пластин-вставок товщиною 6 мм і неоднорідністю породи 0,6 розтягуючі напруження на вісях неоднорідності досягають їх межі міцності одночасно, що виключає можливість керування напрямком тріщиноутворення;

– пластини-вставки товщиною 7 та 8 мм при їх орієнтації вздовж вісі анізотропії з максимальною міцністю Y гарантують тріщиноутворення по цій вісі в заданому діапазоні зміни неоднорідності від 0,6 та вище;

– пластини-вставки товщиною від 5 до 8 мм, орієнтовані вздовж вісі анізотропії з мінімальною міцністю по X , гарантують тріщиноутворення по цій вісі в заданому діапазоні зміни неоднорідності від 0,6 та вище.

В багатьох родовищах блочного каменю існують напрямки, по яких відкол блоків виконується з найменшими енерговитратами. В цьому випадку малу вісь еліпса (2.4) $[\sigma_p]$, який описує ізолінії руйнування гранітів, можна сумістити з вказаним вище напрямком, а центр шпура з пластиною – вставкою сумістити з центром еліпса (2.4) таким чином, щоб вісь пластини – вставки співпадала з малою віссю еліпса (2.4) (рис. 2.20). Вище теоретично доведено, що за рахунок збільшення навантажень під час реакції кристалізації НРС в шпурі з пластиною – вставкою розміри внутрішнього еліпсу почнуть зростати. В даному випадку лінія відколу породи почне розвиватися в напрямку найменших зусиль в момент дотику більшої вершини меншого еліпсу до меншої вершини зовнішнього еліпсу – ізолінії руйнування гранітів, коли напруження досягнуть межі міцності на розтягнення.

При відділенні блоків часто виникає необхідність отримати тріщину розколу не по лінії найменшого супротиву на розривові $[\sigma_p]$, а між вісями $[\sigma_p]$ (X), і $[\sigma_c]$ (Y) (рис. 2.21). В такому випадку потрібно визначити кут між пластиною – вставкою і заданим напрямком розколу.

Розроблена, на основі представлених нижче досліджень, методика

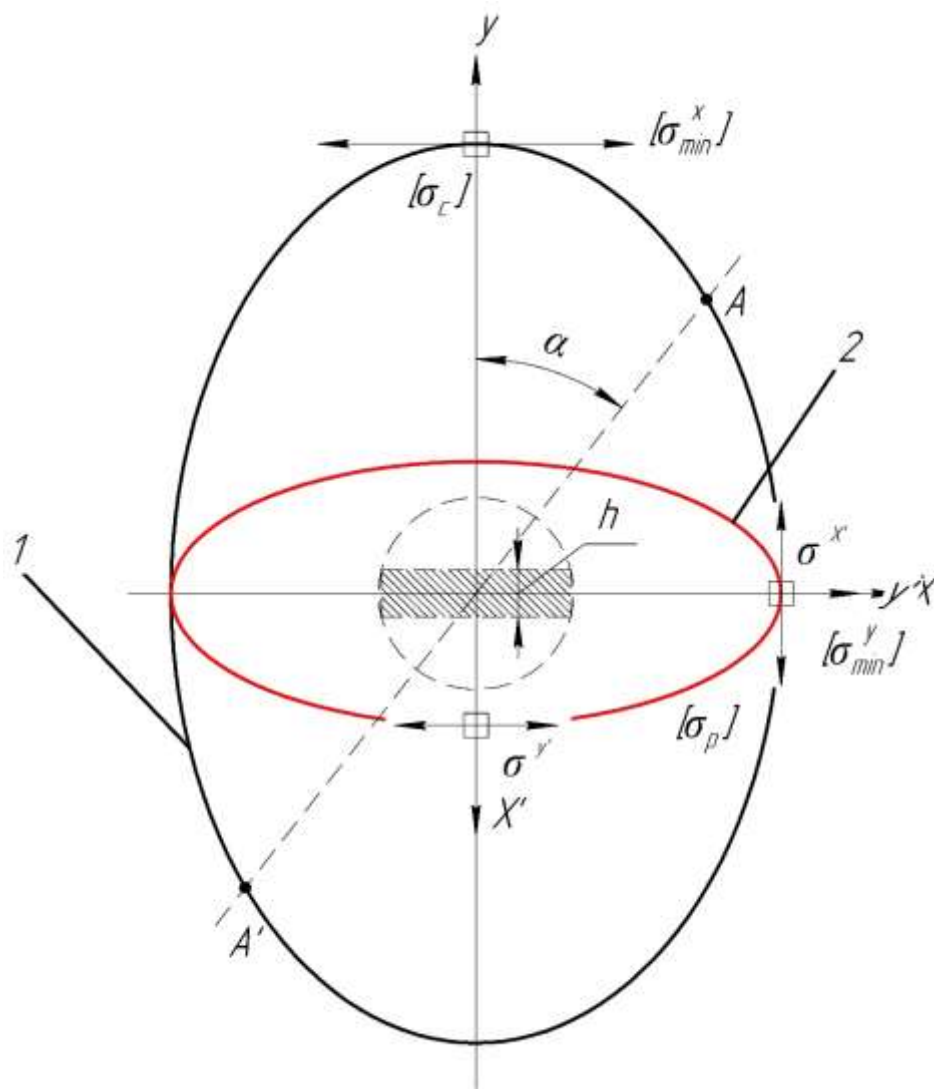


Рис. 2.20. Умовні контури рівних напружень: 1 – розтягуючих напружень під час реакції кристалізації НРС в шпурі з пластиною – вставкою; 2 – ізолінія міцності породи на розрив.

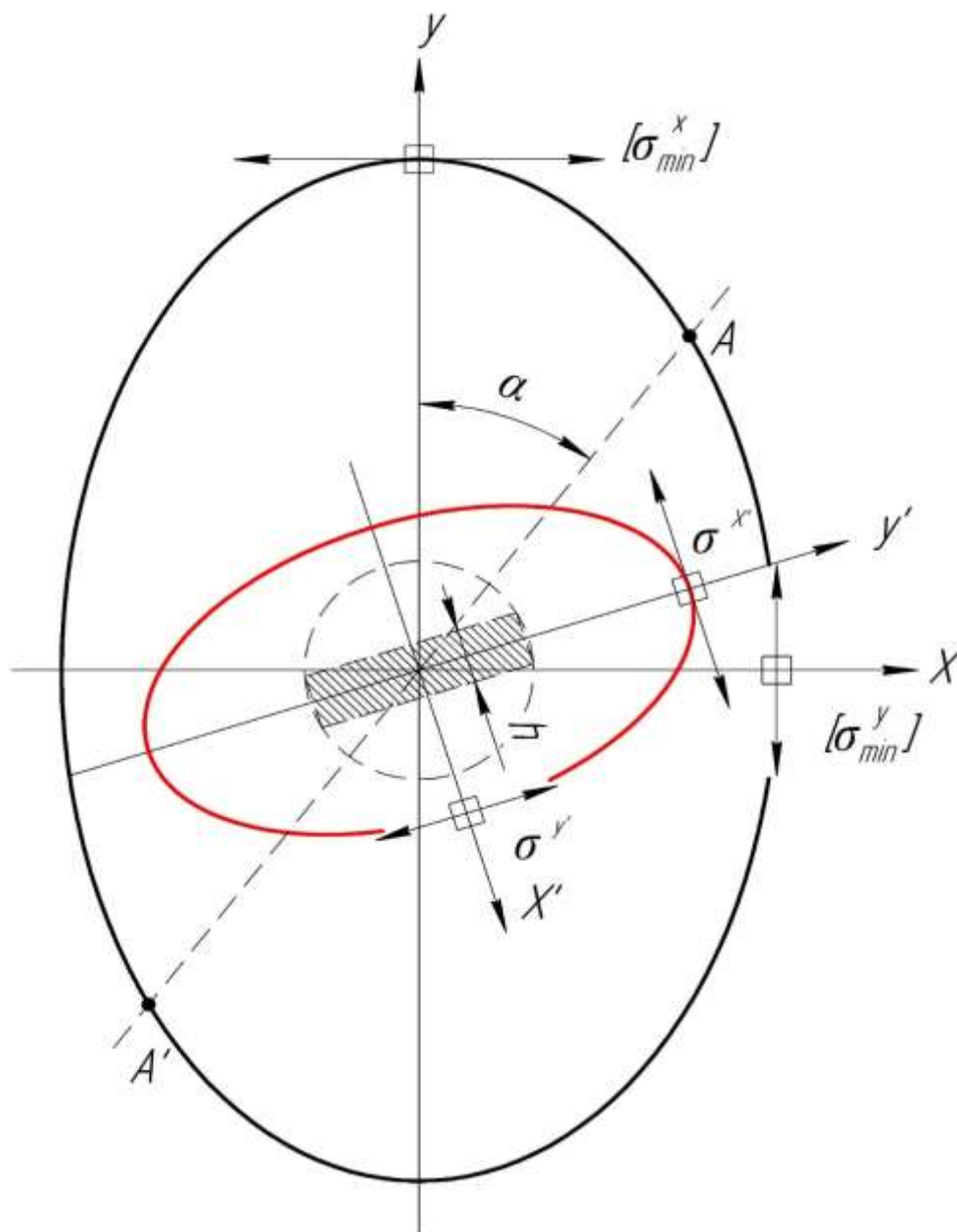


Рис. 2.21. Епюри: 1 – розтягуючих напружень під час реакції кристалізації НРС в шпурі з пластиною – вставкою; і 2 – ізолінія міцності породи.

Керування напрямком тріщиноутворення в секторі між вісями неоднорідності базується на двох припущеннях, а саме:

- зміна ізоліній міцності породи в перерізі шпура може бути представлена еліпсом (2.4);
- розтягуючі напруження, що виникають в результаті кристалізації НРС в шпурі, де встановлена пластина-вставка, входять до третьої умови міцності і

також описуються замкнутою кривою, близькою до еліпса (див. формулу (2.9) і Рис. 2.20 -2.21).

Представлені нижче дослідження методу управління напрямком тріщиноутворення в секторі між вісями неоднорідності базуються на аналізі зв'язків між такими параметрами:

- максимальна межа міцності породи на розтягнення $[\sigma_p]$. Умовно розуміємо, що ці напруження направлені вздовж вісі X шпура (див. рис 2.21);
- максимальна межа міцності породи на стискання $[\sigma_c]$. Умовно розуміємо, що ці напруження направлені вздовж вісі Y шпура (див. рис 2.21);
- товщина пластини-вставки h (див. рис. 2.21);
- α кут між заданим напрямком тріщиноутворення через точки A і A' віссю Y шпура (див. рис. 2.21);
- β – кут між віссю Y шпура і віссю Y' пластини – вставки, що забезпечує утворення тріщин під кутом α до вісі Y шпура (див. рис. 2.21).

Співвідношення осей меншого еліпса на рис. 2.21 і 2.22 дорівнює відношенню розтягуючих напружень $\frac{\sigma'_y}{\sigma'_x}$, спрямованих вздовж вісей Y' та X' та діючих на вісі X' і вісі Y' . Це співвідношення, як було доведено, значно залежить від товщини пластини – вставки. Співвідношення осей більшого еліпса на рис. 2.21 і 2.22 визначається неоднорідними властивостями породи і розраховується, як відношення відношенням мінімальної межі міцності породи на розтягнення $[\sigma_p]$ що діє на вісі шпура X , до максимальної межі міцності на стискання $[\sigma_c]$, що діє на вісі Y .

Процес тріщиноутворення в напрямку під кутом α до вісі Y проходить наступним чином: на першому етапі розміри меншого еліпсу, який подібний умові міцності (2.9), зростають при дії НРС без точок взаємного торкання з еліпсом (2.4).

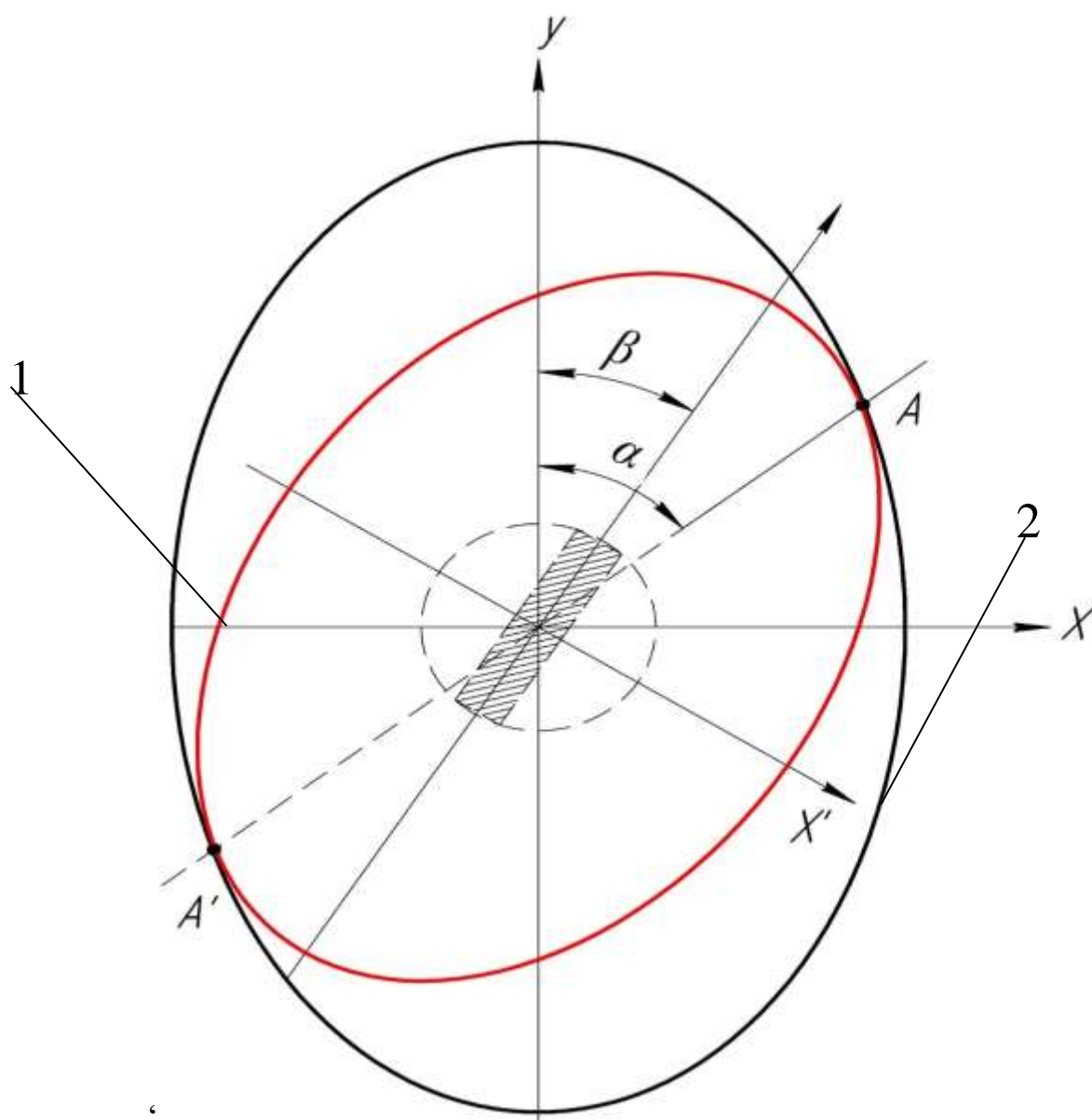


Рис. 2.22. Епюри: 1 – розтягуючих напружень від НРС в шпурі з пластиною – вставкою в момент тріщиноутворення під заданим кутом α ; 2 – ізолінія міцності породи.

В подальшому в процесі зростання тиску в шпурі розміри меншого еліпсу збільшуються до того моменту, коли відбудеться дотик меншого і більшого еліпсів в точках A і A' , що і визначить досягнення тиску в шпурі межі міцності породи на розрив, тобто означатиме початок розколу каменю в напрямку AA' , який пройде під кутом $90^\circ - \alpha$ до вісі X . Відмітимо, що еліпс (2.4) і умова міцності (2.9) описуються

кривими другого порядку, тому в загальному випадку вони перетинаються в чотирьох точках, а у випадку їх дотику перетинаються лише у двох (див. Рис. 2.21). Це і є аналітичною умовою для визначення точок дотику еліпсів. Окрім цього, оскільки задана пряма AA' проходить через центр шпура і перетинає вісь $X (\sigma_x)$ під кутом $90^\circ - \alpha$, то її рівняння можна записати у вигляді $Y = ctg\alpha X$. З Рис. 2.21 слідує, що точка перетину цієї прямої з еліпсом (2.4) співпадає з точкою дотикання внутрішнього еліпсу з еліпсом (2.4). Розв'язавши сумісну систему рівнянь (2.4) і $\sigma_y = ctg\alpha \cdot \sigma_x$ отримаємо координати точки дотику внутрішнього і зовнішнього еліпсів.

$$X(\sigma_x) = \pm \frac{[\sigma_p] \cdot [\sigma_c]}{\sqrt{[\sigma_c]^2 + [\sigma_p]^2} \cdot ctg^2 \alpha}, \quad Y(\sigma_y) = \pm \frac{[\sigma_p] \cdot [\sigma_c]}{\sqrt{[\sigma_c]^2 + [\sigma_p]^2} \cdot ctg^2 \alpha} \cdot ctg \alpha \quad (2.25)$$

З рис. 2.21 слідує, що кут α повинен бути більше 45° , щоб визначалося лише дві точки дотику меншого і більшого еліпсів, бо при $\alpha < 45^\circ$ буде чотири точки перетину еліпсів і початок тріщиноутворення не буде визначений однозначно.

При цьому за допомогою комп'ютерної програми «Компас» визначається такий важливий технологічний параметр, як кут β між віссю пластини – вставки і віссю Y . Саме установка вісі пластини-вставки під кутом β до вісі Y забезпечить тріщиноутворення в шпурі під кутом $90^\circ - \alpha$ до вісі X (див. Рис. 2.21).

З рис. 2.21 слідує, що в даному випадку велика вісь внутрішнього еліпсу, яка проходить під кутом β до вісі Y буде більшою ніж пряма OA . Це, в свою чергу свідчить про те, що для розколу породи під кутом α до вісі Y в шпурі з пластиною – вставкою необхідно створити тиск більший за $[\sigma_p]$ на $10 \div 15\%$.

Для проведення досліджень з метою визначення реальних значень кута β задаємося наступним комплексом визначадельних умов:

- неоднорідність породи має значення 0.28; 0.125; і 0.03;
- необхідний кут тріщиноутворення складає 45° , 60° ;
- товщина пластини – вставки дорівнює 5, 6, 7 і 8 мм.

Результати проведених аналітичних досліджень зведено в таблиці 2.4

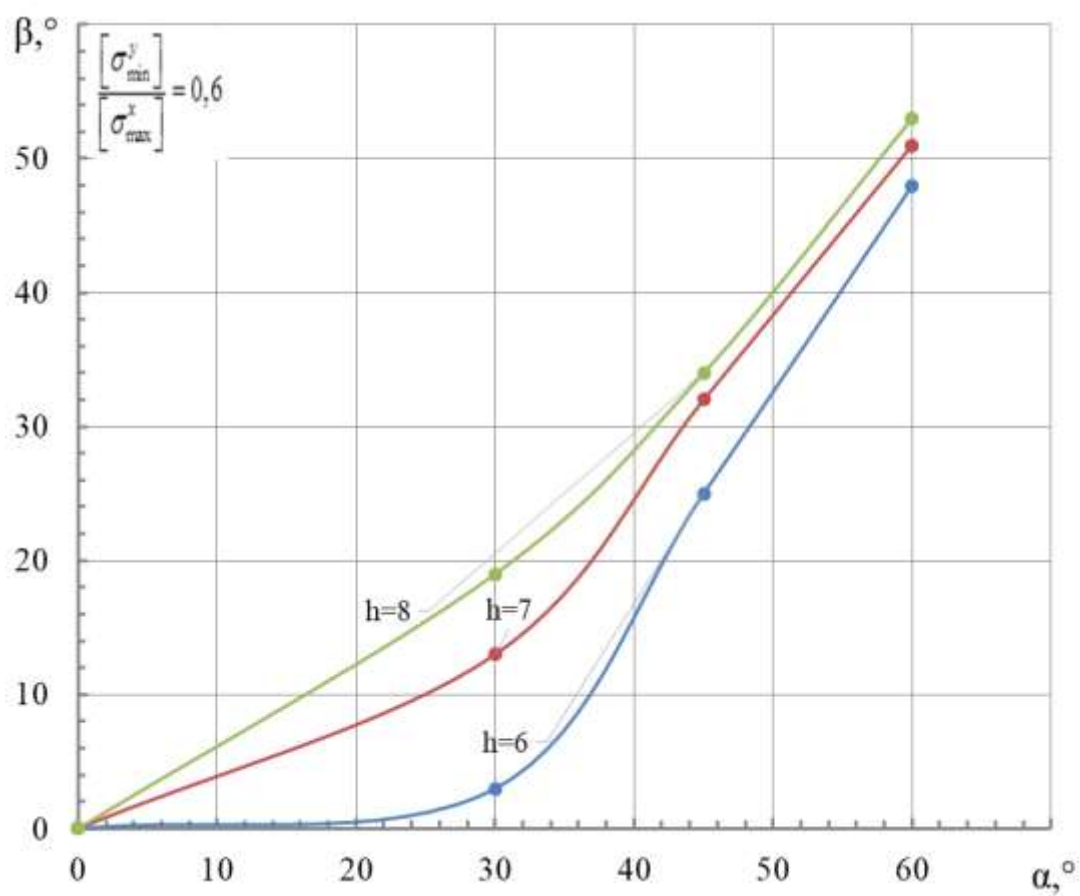
Таблиця 2.4.

Залежність кута β від неоднорідності породи, кута тріщиноутворення і товщини пластини-вставки.

Неоднорідність породи $\frac{[\sigma_{\min}^y]}{[\sigma_{\max}^x]}$ $\frac{[\sigma_p]}{[\sigma_c]}$	Кут тріщиноутворення α , град	Товщина пластини – вставки h , мм	Кут орієнтації пластини- вставки β , град
0,6	30°	5	-
		6	3°
		7	13°
		8	19°
	45°	5	18°
		6	25°
		7	32°
		8	34°
	60°	5	44°
		6	48°
		7	51°
		8	53°
0,7	30°	5	12°
		6	17°
		7	21°
		8	23°
	45°	5	27°
		6	32°
		7	36°
		8	37°
	60°	5	48°
		6	51°
		7	53°
		8	54°

Продовження таблиці 2.4.

0,8	30°	5	21°
		6	24°
		7	25°
		8	26°
	45°	5	35°
		6	37°
		7	39°
		8	40°
	60°	5	52°
		6	54°
		7	56°
		8	56°

Рис. 2.23. Залежність кута β від кута α при неоднорідності 0,6

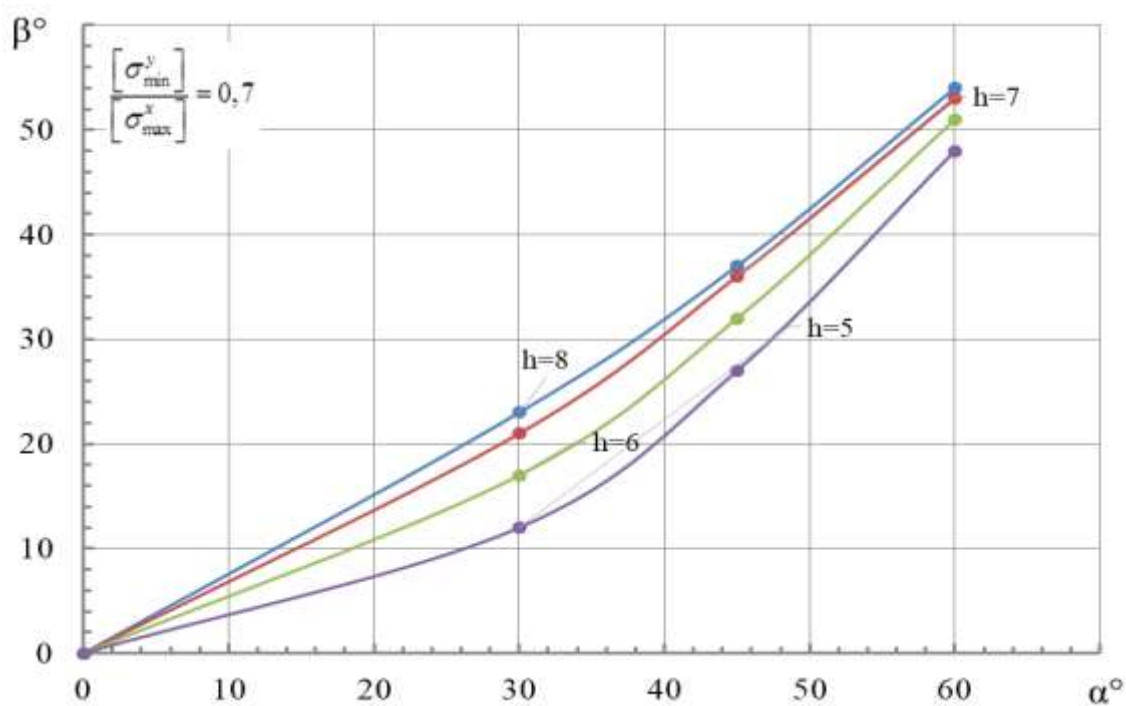


Рис. 2.24. Залежність кута β від кута α при неоднородності 0,7

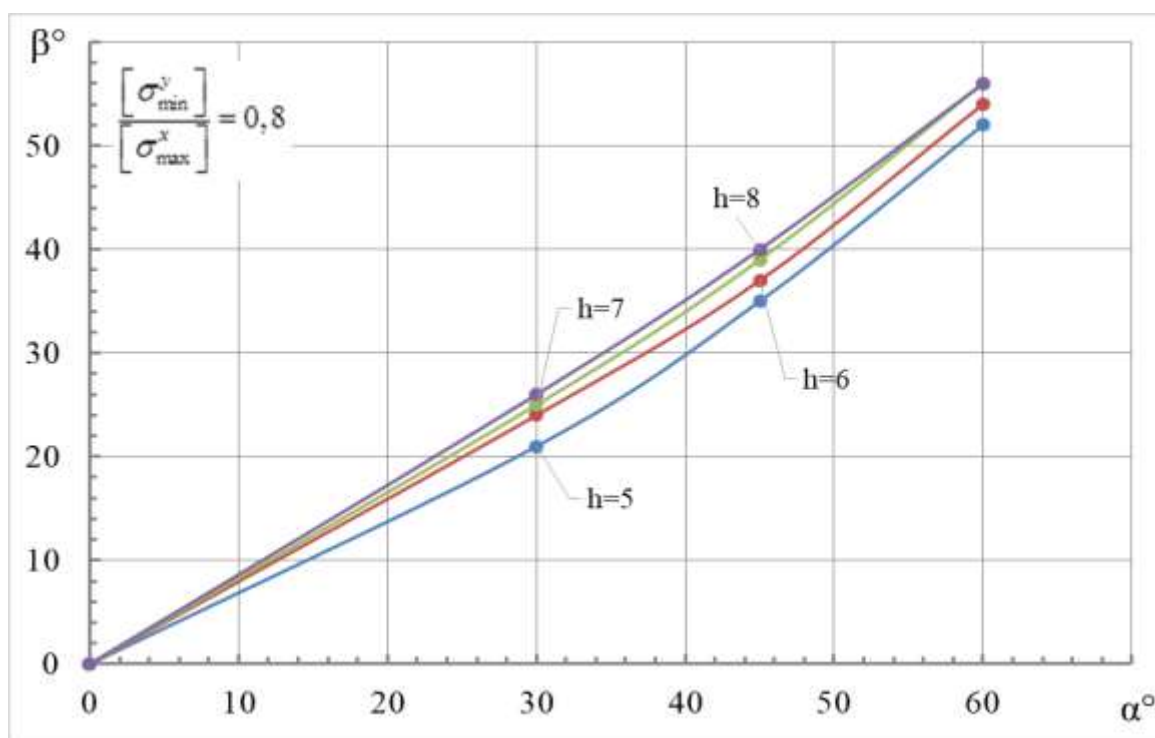


Рис. 2.25. Залежність кута β від кута α при неоднородності 0,8

Висновки до розділу

Результати проведених досліджень, представлені в [106 -108], дозволили зробити наступні висновки:

1 Вперше чисельними методами досліджено розподіл напружень навколо шпуру з НРС і пластиною – вставкою, що дало змогу визначити технологічні параметри розколу скельної породи з допомогою пластин – вставок в діапазоні $5 \text{ мм} \leq h \leq 8 \text{ мм}$.

2. Чисельний аналіз умов міцності вказує на те, що завдяки присутності пластини – вставки в шпурі на її торцях створюються концентратори розтягуючих напружень, які визначають напрямок розколу породи вздовж пластини – вставки.

3. Співвідношення σ_x/σ_y показує різницю в розтягуючих напруженнях, які виникають по осях X та Y , а тому характеризують ступінь вірогідності отримання заданого напрямку тріщиноутворення.

4. Пластини з більшою товщиною (8 мм) забезпечують більшу вірогідність тріщиноутворення в заданому напрямку, але вони суттєво зменшують тиск від НРС (в шпурі діаметром 40мм до 10%), що впливає на ширину отриманої тріщини розколу.

5. Залежність $\frac{\sigma_x}{\sigma_y} = f(h)$ практично подібна для різних порід при однакових товщинах пластин – вставок, що можна пояснити тим, що розподіл напружень подібно залежить від модуля пружності та коефіцієнту Пуассона і від товщини пластини – вставки. Доповнюючим фактором можна назвати те, що граніт має дуже малу зону плинності, тобто графік напруження-деформація має майже лінійний характер до межі міцності.

6. Розроблено метод керування напрямком тріщиноутворення в секторі між осями анізотропії, що базується на встановлених закономірностях формування системи розтягуючих напружень навколо шпура з НРС, пов'язаною з орієнтацією керуючої пластини-вставки відносно положення осей анізотропії та заданого напрямку площини відриву в анізотропному масиві.

7. Аналітично доведено, що для розколу породи під кутом α до вісі Y в шпурі з пластиною – вставкою необхідно створити тиск, більший на $10 \div 15\%$ за $[\sigma_p]$ породи.

РОЗДІЛ III

ОБГРУНТУВАННЯ МЕТОДІВ ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНИХ ДОСЛІДЖЕНЬ З ВИКОРИСТАННЯМ НРС ТА АГРЕГАТУ З КЕРУЮЧОЮ ПЛАСТИНОЮ – ВСТАВКИ

3.1. Методика проведення лабораторних досліджень

Розроблені в другому розділі теоретичні методики визначення технологічних параметрів для керування заданим напрямом тріщиноутворення в шпурах, де встановлені агрегати з пластинами-вставками, а саме: товщини пластини-вставки, орієнтації цієї пластини згідно напрямку тріщиноутворення, показників характеризуючи ступінь анізотропії породи – базувались на рішенні плоских задач теорії пружності з урахуванням.

Тому мета експериментальних досліджень – довести можливість практичного використання в промислових умовах отриманих при аналітичних дослідженнях технологічних параметрів. Для цього необхідно отримати данні про фактичні процеси, які відбуваються в породі під час керування заданим напрямом тріщиноутворення в шпурах, де протікає реакція кристалізації НРС.

Для досягнення наведеної мети під час експериментальних досліджень треба вирішити наступні задачі:

1) довести можливість отримання в шпурі за допомогою розробленого агрегату з пластиною-вставкою симетричного нерівномірного навантаження на стінку шпура;

2) практично отримати цифри, які характеризують для пластин-вставок різної товщини співвідношення мінімального та максимального навантаження (деформації) по осях поперечного перетину шпура та порівняти їх з результатами аналітичних досліджень;

3) експериментально підтвердити реальну можливість керування напрямом тріщиноутворення за допомогою розробленої в другому розділі методики.

Враховуючи те, що проведення лабораторних досліджень, пов'язаних з

руйнуванням моделей з природного каменю, потребує значних матеріальних затрат, було прийнято рішення провести лабораторні дослідження в два етапи.

Перший етап включає в себе експерименти по вивченню напружено – деформованого стану сталевих цільнотягнутих труб з використанням НРС та агрегатів з пластинами-вставками різної товщини. На цьому етапі вивчається співвідношення мінімальних та максимальних деформацій, які виникають в місцях максимальних та мінімальних напружень. Саме від величини цього співвідношення залежить вірогідність отримання тріщини розколу в наперед заданому напрямку.

Другий етап лабораторних досліджень включає експерименти на бетонних моделях. В роботі [109 - 111] було доведено можливість використання бетонних моделей замість вартісних гранітних моделей, оскільки бетон має характеристики міцності одного порядку з багатьма гранітами. При цьому передбачено проведення експериментів, як на бетонних моделях, які мають ізотропні властивості, так і на моделях з штучною анізотропією . Для цього була розроблена спеціальна технологія їх отримання, яка описана в даному розділі.

Для обґрунтування можливості такої заміни були проаналізовані основні характеристики міцності різних порід і бетону [109-111] (табл. 3.1). Насамперед це стосувалось таких характеристик як міцність на одновісне стискання σ_0 та міцність на розрив σ_p .

В таблиці наведені також характеристики міцності бетону, отриманого на базі цементу марки 500 (ДСТУ БВ.2.7-46-96).

Таблиця 3.1.

Характеристики міцності гірських порід і бетону [109-111]

Характеристики міцності	Габродіабаз	Кварцит	Сланець	Бетон (цемент марки 500)
σ_c , МПа	260	110	46	48
σ_p , МПа	14	6	5	4 - 5

Слід зазначити, що максимальна міцність бетону гарантується, якщо строго дотримуватись терміну та умов зберігання цементу, а також технології приготування бетону.

Детальну програму запланованих лабораторних досліджень наведено на рис 3.1.

Для точного визначення потенційних силових можливостей НРС, які використовувались для проведення експериментальних досліджень було вирішено застосувати сталі цільнотягнуті труби з зовнішнім діаметром 45 мм. Та товщиною стінки 2,5 мм. Внутрішня порожнина труби мала діаметр 40 мм та імітувала порожнину шпуру в гірській породі.

Спочатку загерметизована порожнина труби навантажувалась гідравлічним тиском, який замірявся манометром МП – 160 з класом точності 1,5. Одночасно величина нормального прогину труб в поперечному перетині та зона пружних деформацій визначалась індикатором ІЧ – 10 з класом точності 0,01 мм.

Після отримання для вказаної труби тарирувального графіку, труба заповнювалась НРС та герметизувалась. Величина нормального прогину труби в поперечному перетині під час реакції кристалізації НРС знову визначалась індикатором ІЧ – 10. Після цього тиск, який розвивала НРС, знаходився за допомогою тарирувального графіку.

Враховуючи, що лабораторні експериментальні дослідження проводились на бетонних моделях, які імітували гірську породу, в тому числі і породу з неоднорідними властивостями, ретельна увага була приділена визначенню межі міцності бетонів для виготовлення моделей. Для цього з бетонів з різною концентрацією цементу були виготовлені кубики з стандартним розміром ребер, що дорівнюють 100 мм (див. рис.3.2).



Рис. 3.1. Програма запланованих лабораторних досліджень

Тому для гарантії чіткої фіксації тиску руйнування бетону було застосовано для експериментальних досліджень спеціальну дослідну гідроустановку, яка була реалізована на базі лабораторного гідравлічного пресу з насосом тиску до 100 МПа (рис.3.3).



Рис. 3.2. Бетонні кубики для визначення межі міцності бетонів

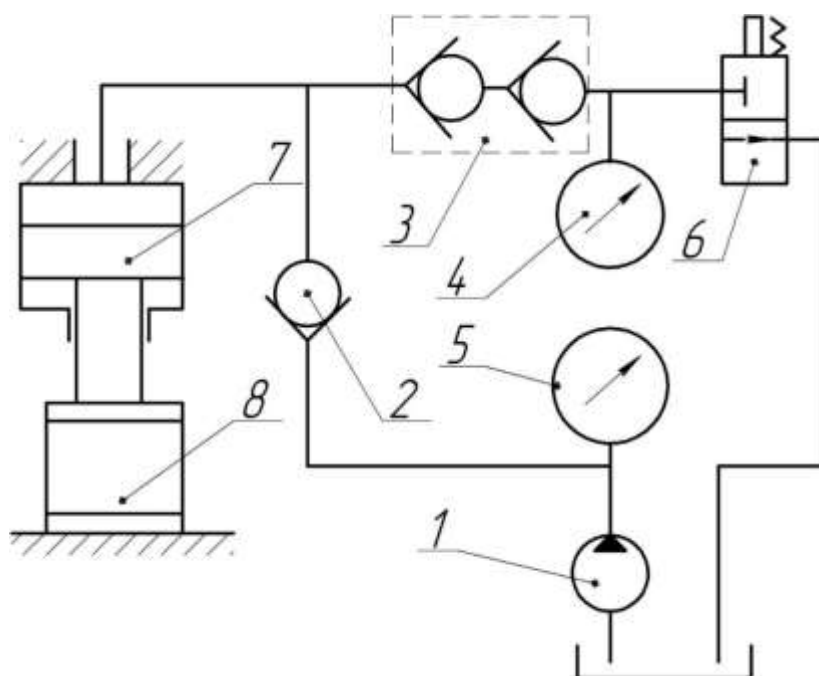


Рис. 3.3. Гідравлічна схема дослідної установки для фіксації тиску руйнування бетонних кубиків

Схема включає плунжерний насос 1, зворотні клапани 2 та 3, манометри 4 та 5, вентиль 6, гідроциліндр 7, який навантажує бетонний кубик 8.

При роботі насосу 1 і підвищеному тиску в гідросистемі манометри 4 та 5 будуть показувати однаковий тиск.

При руйнуванні бетонного кубика 8 відбувається швидке падіння тиску в гідросистемі. На це явище відреагує манометр 5, який безпосередньо зв'язаний з порожниною гідроциліндра 7. Манометр 4 при різкому падінні тиску в гідросхемі буде перекритий подвійним зворотнім клапаном 3 і вентилем 6, а тому буде точно фіксувати максимальний тиск, що діяв в гідросистемі в момент руйнування бетонного кубика.

Подвійний зворотній клапан 3 і вентиль 6 для скидання тиску в манометрі 4 перед збиранням обладнання були ретельно притерті алмазною пастою та перевірені на 100% герметичність, що забезпечує точний замір тиску (з точністю манометра 4) в момент руйнування бетонного кубика.

Загальний вигляд описаної дослідної установки, зібраної на базі лабораторного гідравлічного пресу, наведений на (рис.3.4.)



Рис. 3.4. Дослідна гідравлічна установка для визначення міцності бетону

Визначення необхідної кількості дослідів базувалося на роботі [110]. Вихідними даними при визначенні необхідної кількості дослідів були такі величини:

- похибка отриманих результатів не повинна бути більшою 8%;
- довірча імовірність повинна складати 0,9;
- систематична похибка вимірювальної апаратури знаходиться в межах 3-5 %.

Було також прийнято, що випадкові помилки описуються законом нормального розподілу, а грубі помилки виключаються.

Оскільки систематичних помилок вимірювальної апаратури уникнути неможливо, щоб сумарні похибки не перевищували 8 %, випадкові помилки не повинні перевищувати 4 %. Якщо прийняти, що кількість дослідів $n = 200$ виключить імовірність похибки, то 4 % від такої кількості складе $\varepsilon_\beta = 8$. Тоді оцінка середньоквадратичного відхилення одного вимірювання (допустима похибка) складе:

$$\sigma_{\tilde{m}} = \frac{\varepsilon_\beta}{t_\beta} = \frac{8}{1,643} = 4,85 , \quad (3.1)$$

де t_β – значення функції нормального розподілу для довірчої імовірності 0,9.

Оцінка середньоквадратичного відхилення для математичного очікування при кількості дослідів $n = 20$, менше якого неможна користуватись законом нормального розподілу, складе:

$$\tilde{\sigma} = \sigma_{\tilde{m}} \sqrt{n} = 4,85 \sqrt{20} = 21,6 , \quad (3.2)$$

Мінімальна кількість дослідів, необхідна для отримання достовірності результатів досліджень, що вимагається:

$$n = \frac{\tilde{\sigma}^2 t_\beta^2}{\varepsilon_\beta^2} = \frac{21,6^2 \cdot 1,643^2}{8^2} = 20 \quad (3.3)$$

Визначення досліджуваних параметрів проводилось за їх «оцінками» [110].

Математичним сподіванням будь – якої величини називається сума всіх можливих для неї значень, помножених на їхні ймовірності:

- оператор математичного сподівання;
- математичне сподівання величини.

математичне сподівання можна визначати за формулою

$$M[Y] = M[\varphi(x)] = \sum_{i=1}^n \varphi(x_i) p_i$$

Оцінками математичного очікування: Середнє арифметичне вимірювань

$$\tilde{m} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} , \quad (3.4)$$

Оцінка середньоквадратичних помилок для серій з n вимірювань

Середньоквадратичне відхилення $D_{\text{ср}}$, від середнього вимірювання , мм:

$$\sigma_{\tilde{m}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \tilde{m})^2}{n(n-1)}} , \quad (3.5)$$

де $x_i = x_1, x_2 \dots x_n$ – конкретне значення вимірюваних параметрів.

Відповідно до теорії похибок всі відхилення вимірюваних величин від істинних підпорядковуються «закону розподілу Стюдента». На основі цього закону складені таблиці значень t_α в залежності від довірчої імовірності і кількості дослідів $n-1$. Задаючись довірчою імовірністю 0,9, можна визначити точність замірів:

$$\varepsilon = t_\alpha \sigma_{\tilde{m}} , \quad (3.6)$$

значення досліджуваного параметру складатиме:

$$m = \tilde{m} \pm \varepsilon , \quad (3.7)$$

При визначенні нормальних прогинів сталевих труб а також тиску в них було прийнято $m = \tilde{m} \pm \varepsilon$. Допускалась похибка вимірювань до $\varepsilon = 4 \%$, що з урахуванням систематичних похибок вимірювальної апаратури не перевищило 8% .

3.2. Визначення потенційних силових можливостей НРС для лабораторних досліджень

Основним технологічним параметром, який характеризує ефективність використання НРС в гірничій технології, є тиск, який здатна розвивати суміш. Ця характеристика суміші залежить від ряду факторів [1]:

- хімічного складу суміші (марки НРС);
- строку зберігання суміші;
- надійності гідроізоляції тари для зберігання НРС;
- оптимального вибору потрібного об'єму води та маси НРС перед використанням суміші;
- надійної герметизації об'єму шпура, де буде протікати реакція кристалізації НРС;
- температури оточуючого середовища.

Враховуючи діапазон перерахованих факторів, які впливають на силові можливості НРС, було вирішено провести тестування НРС, обраної для експериментальних досліджень.

Для проведення експериментів вирішено використати сталеву цільнотягнуту (без зварного шву) трубу, виготовлену з легованої сталі 40Х, модуль пружності якої $E = 2,15 \times 10^5$ МПа і коефіцієнт Пуассона $\nu = 0,27$. Внутрішній діаметр труби дорівнював 40 мм, довжина 330мм, а товщина стінки 2 мм. Вибір внутрішнього діаметру пояснювався використанням в гірничій технології видобутку природнього каменю бурових коронок діаметром 40 мм, які широко використовуються, як для ручного, так і машинного буріння шпурів.

Експеримент проведений в два етапи, а саме:

1. Провести тарування сталюї труби, при якому визначити залежність збільшення зовнішнього діаметру труби від внутрішнього тиску, який був отриманий за допомогою плунжерного гідронасосу високого тиску.

2. Заміряти збільшення зовнішнього радіуса (нормального прогину) труби після протікання в трубі реакції кристалізації НРС і за допомогою тарувального графіку, побудованого під час першого етапу експериментів, визначити тиск, який був отриманий за допомогою НРС.

На рис.3.5 представлено лабораторне пристосування для тарування сталюї труби за допомогою гідроприводу.

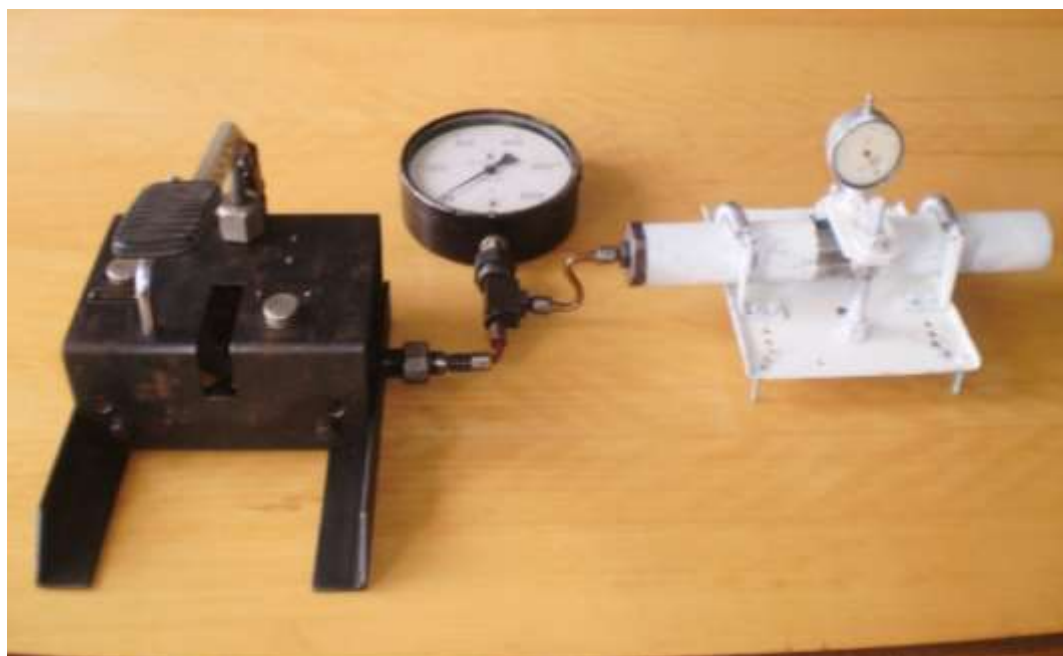


Рис. 3.5. Тарування сталюї труби з використанням гідроприводу

Тарувальний графік, отриманий за допомогою наведеного вище пристосування представлений на рис. 3.6.

Представлений графік дозволяє зробити висновок, що після тиску 43 МПа зона пружних нормальних прогинів закінчується та починається зона пластичних нормальних прогинів труби.

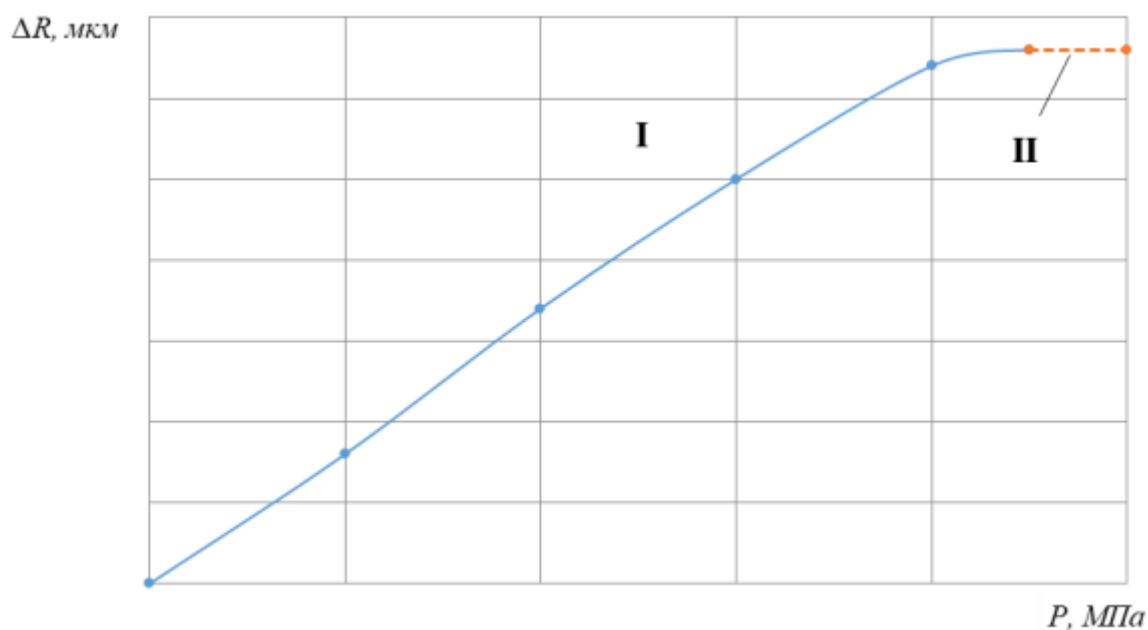


Рис. 3.6. Залежність збільшення радіусу труби ΔR від внутрішнього тиску P , МПа; де I – зона пружних нормальних прогинів труби; II – зона пластичних нормальних прогинів труби.

Отримані експериментальні дані практично збігаються з теоретичними розрахунками значення тиску в циліндричній оболонці, розрахованими згідно формули $P = \frac{\Delta R h E}{R^2 (1 - \frac{\nu}{2})}$ [112-113]. Це вказує на високу точність експерименту і достовірність отриманих експериментальних даних, які наведені на рис. 3.6.

Практика гірничих технологій видобутку природного каменю показала, що тріщиноутворення в шпурах найбільш міцних порід настає при значеннях тиску порядку 35,0-38,0 МПа.

Аналіз даних, наведених в роботі [115], засвідчив що максимальний тиск, який здатний розвивати НРС, як правило, не перевищує 40 МПа.

Таким чином, обрана для експериментів труба з внутрішнім діаметром 40 мм, та товщиною стінки 2 мм, з точки зору міцності, може витримувати тиск, який здатні розвивати сучасні НРС, оскільки вона буде працювати в зоні пружних деформацій (див. рис.3.6).

На (рис.3.7) представлено пристосування для заміру тиску, що буде розвивати НРС марки НРС-80, яка обрана для проведення експериментальних досліджень.

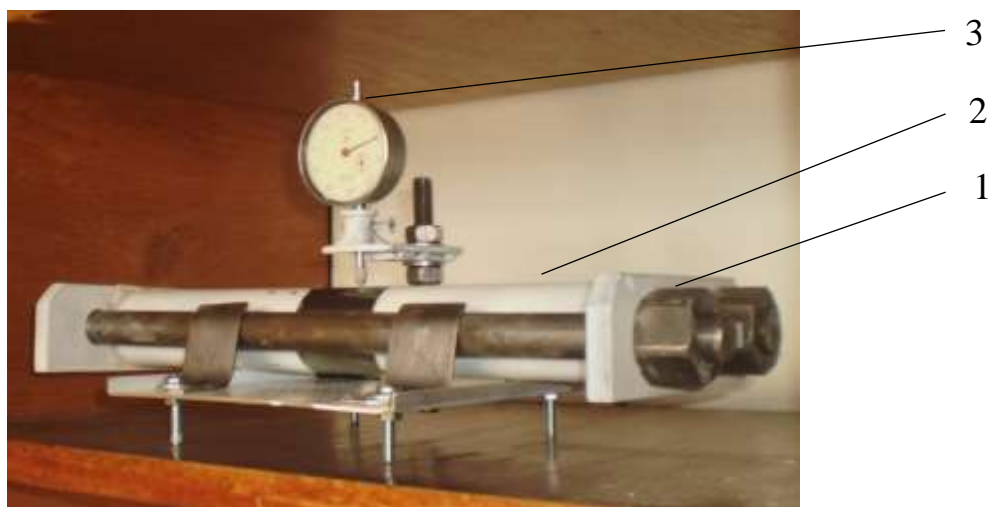


Рис. 3.7. Стенд для заміру тиску, отриманого після кристалізації НРС марки НРС-80, де: 1 - рама; 2 - труба з НРС; 3 - індикатор для заміру нормальних прогинів труби

На рис. 3.8 представлена залежність росту тиску, який розвиває НРС, від часу кристалізації. Залежність отримано за допомогою стенду, зображеного на рис. 3.7.

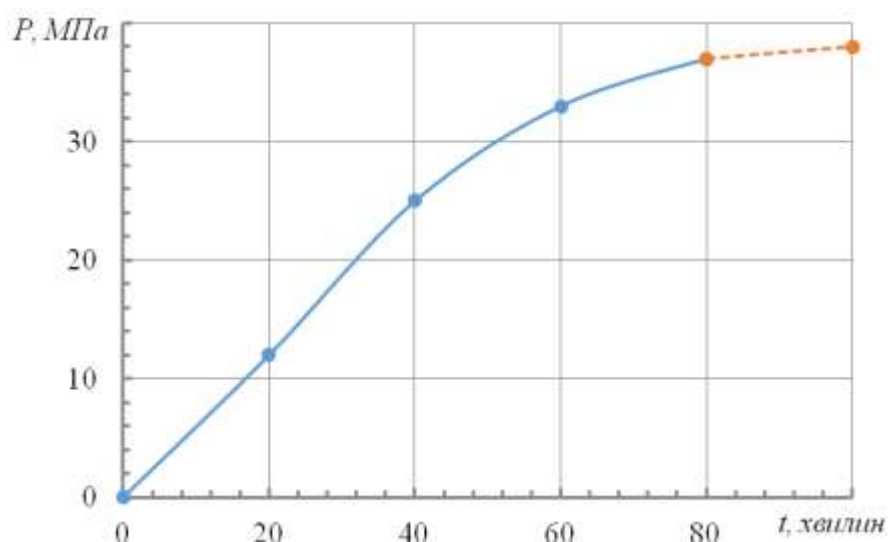


Рис. 3.8 – Зростання тиску в трубці під час реакції кристалізації НРС

Зафіксовані результати дають можливість зробити висновок, що обрана НРС марки НРС здатна розвивати тиск до 38,0-39,0 МПа, а тому може бути використана для проведення експериментальних досліджень.

3.3. Визначення відстані між шпурами з НРС у разі застосування пластин-вставок

Методика визначення необхідної відстані між шпурами при видобутку гранітних блоків за допомогою НРС наведена в роботі [115]. З цією метою автори пропонують використовувати аналітичну залежність, яка враховує не тільки постійні технологічні параметри, але і особливості фізичних процесів, що змінюються в часі. Аналітичний вираз, що пройшов перевірку практикою і використовується для розрахунку відстані між шпурами, заповненими НРС, наведений в роботі [115] і має вигляд:

$$L = \frac{0,5 \cdot \pi \cdot d_{\text{ш}} \cdot l_{\text{ш}} \cdot P(t)}{H \cdot \sigma_p \cdot K(t)}, \quad (3.8)$$

де L – відстань між шпурами з НРС, м; $d_{\text{ш}}$ – діаметр шпура, м; $l_{\text{ш}}$ – довжина шпура, м; H – висота блоку, м; $P(t)$ – змінний в часі тиск в шпурі, МПа; σ_p – межа міцності породи на розтягування, МПа; $K(t)$ – коефіцієнт, що враховує зниження міцності породи за час навантаження який змінюється від 0,1 до 0,7 в залежності від орієнтації площини відколювання вздовж шару, або під кутом до нього (анізотропні властивості, релаксацію).

Таким чином, параметри $p(t)$ і $k(t)$ у формулі (3.8) будуть змінюватися в значних діапазонах в залежності не тільки від міцності та анізотропних властивостей каменю, а й від часу навантаження.

$$L = \frac{0,5 \cdot \pi \cdot d_{\text{ш}} \cdot l_{\text{ш}} \cdot P(t)}{H \cdot \sigma_p \cdot K}, \quad (3.9)$$

Враховуючі відмінності в процесах, які супроводжують наростання тиску в шпурах при використанні НРС та при використанні пластин-вставок, дисертантом запропонована формула для розрахунку відстані між шпурами, де тиск концентрується розробленими пластинами-вставками.

Таким чином, у разі успішної експериментальної перевірки, може використовуватись для розрахунку відстані між шпурами, де тиск створюють розроблені пластини-вставки для розколу блоків. [33]

У роботі [116] також подано рекомендації авторів зменшувати на 10-15% розрахункову відстань між шпурами, отриману за допомогою наведеної вище залежності (3.8).

Ця рекомендація повинна забезпечити умови взаємодії полів напружень сусідніх шпурів, що буде гарантувати розкол породи по лінії шпурів.

Накладення епюр сусідніх шпурів при правильному розрахунку відстані між шпурами представлено на рис. 3.9 і 3.10.

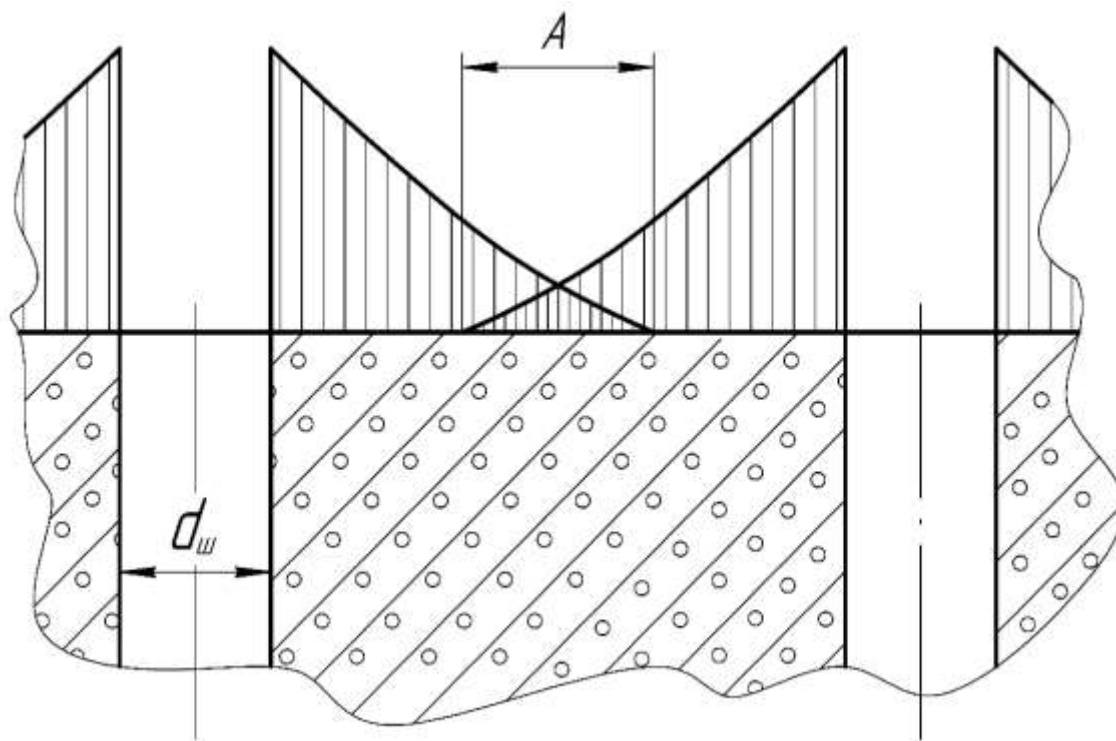


Рис. 3.9. Накладення епюр сусідніх шпурів (вид на шпури збоку)

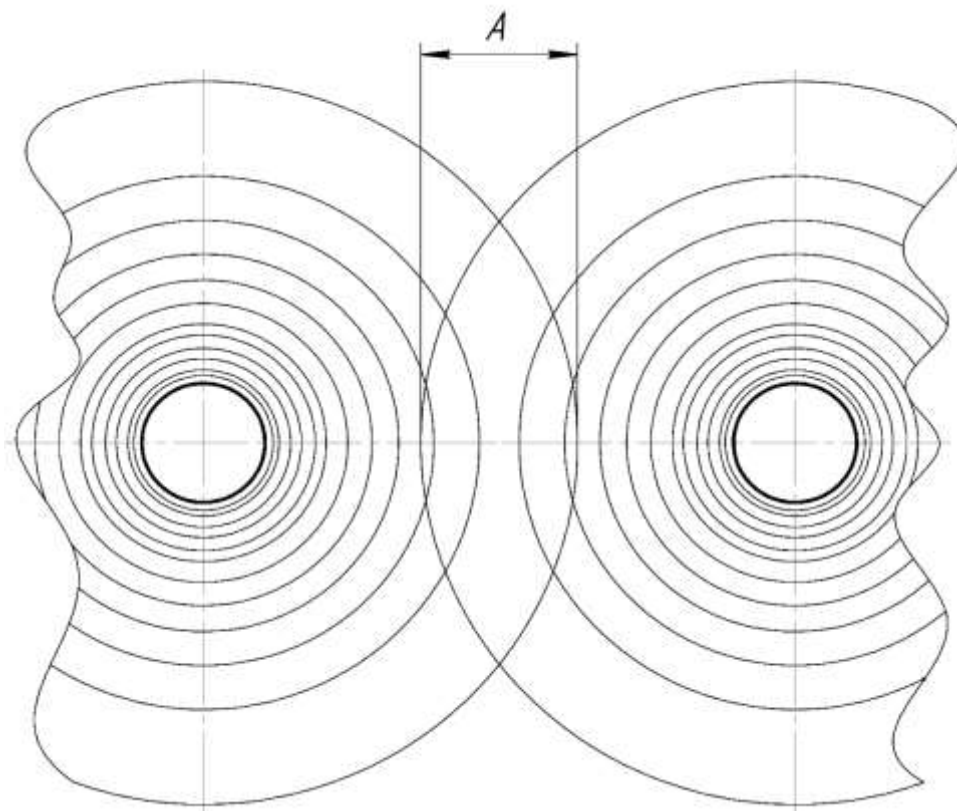


Рис. 3.10. Накладення епюр сусідніх шпурів в ізотропному середовищі.

Наведена вище формула (3.8), а також епюри на рис.3.9 і 3.10 виконані для шпурів, де не передбачено замикання НРС в шпурі перед початком кристалізації суміші.

Розроблений з участю автором цієї роботи агрегат з пластиною – вставкою [96] передбачає герметичне запирання НРС в шпурі, що забезпечує наступні переваги:

- збільшує всередині шпура тиск НРС;
- виключає «постріли» НРС з порожнини шпуру, що підвищує безпеку технологічного процесу;
- за рахунок застосування пластини-вставки формує нерівномірне поле напружень по осях шпура, що дає можливість керувати напрямком тріщиноутворення;

Пошукові експерименти, проведені автором, показали можливість збільшити енергетику НРС в запертому шпурі, що дає можливість виключити на практиці вимоги до накладення епюр сусідніх шпурів, тобто збільшити відстань між

шпурами і забезпечити керування напрямком тріщиноутворення за рахунок відповідної орієнтації пластини-вставки і формування нерівномірного поля напружень по осях шпура.

Епюри розтягуючих напружень в шпурах з НРС та орієнтація пластини – вставки уздовж лінії розташування шпурів (лінії розколу породи) представлені на рис. 3.11 та 3.12.

Виходячи з форми епюр розтягуючих напружень (див. рис. 3.12) можна зробити висновок, що утворення тріщин в шпурах буде ініційовано в точках А і В. Такий висновок можна зробити у випадку, якщо орієнтація пластин-вставок і їх товщина буде вибрана з урахуванням неоднорідних властивостей породи.

Остаточні висновки про можливість збільшення відстані між шпурами можуть бути зроблені тільки після проведення експериментальних досліджень.

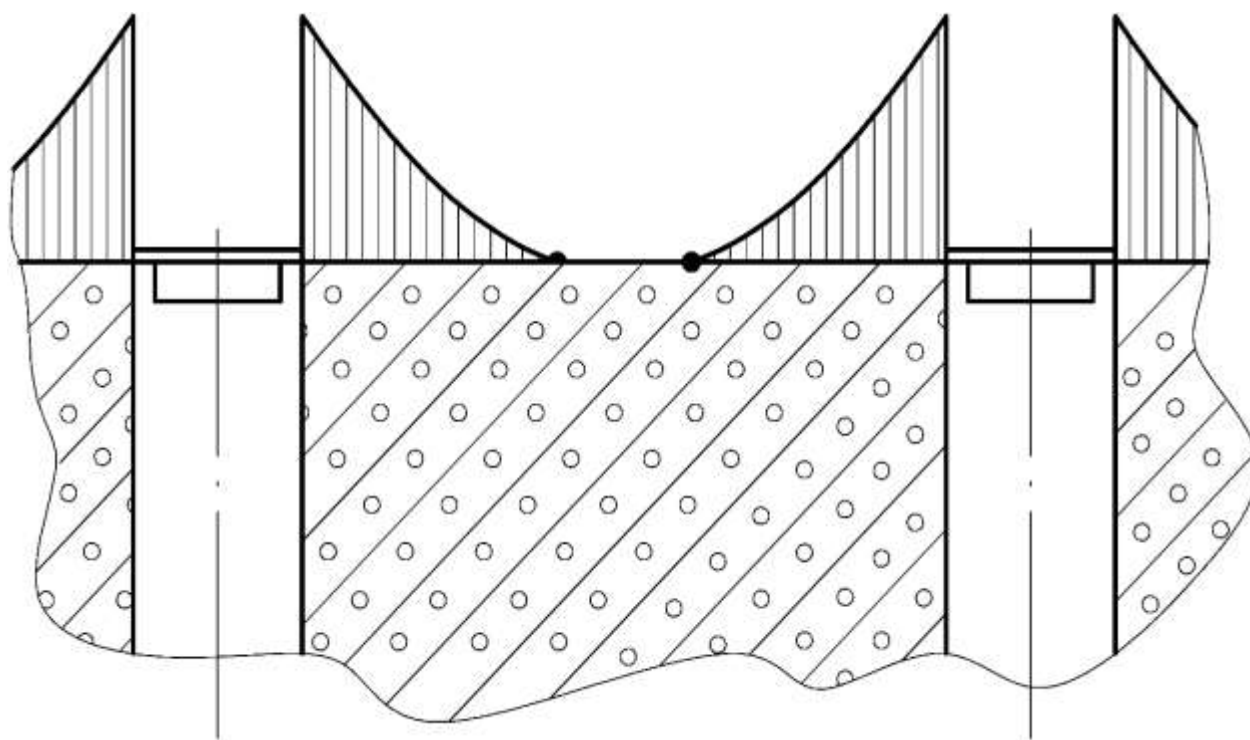


Рис. 3.11. Епюри розтягуючих напружень з пластинами-вставками (вид на шпури збоку)

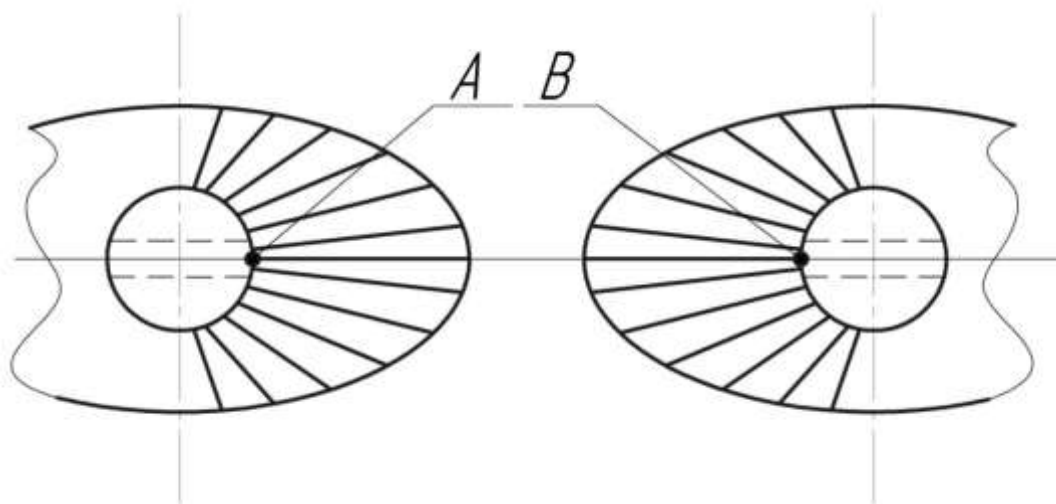


Рис. 3.12. Епюри розтягуючих напружень в шпурах з пластинами-вставками (вид на шпури зверху).

Висновки до розділу

Розроблено методику проведення експериментів та лабораторне обладнання для випробування силових можливостей НРС, яке використовувалось в промислових умовах.

Отримані результати свідчать, що суміш НРС здатна розвивати тиск до 38,0-39,0 МПа в пружному режимі, а тому може бути використана для проведення подальших експериментальних досліджень.

Отримані експериментальні дані збігаються з теоретичними розрахунками значення тиску в циліндричній оболонці. Практика гірничих технологій видобутку природного каменю показала, що тріщиноутворення в шпурах найбільш міцних порід настає при значеннях тиску порядку 35,0-38,0 МПа.

Виходячи з форми епюр розтягуючих напружень, можна зробити висновок, що утворення тріщин в шпурах буде ініційовано в точках А і В. Такий висновок можна зробити у випадку, якщо орієнтація пластин-вставок і їх товщина буде вибрана з урахуванням неоднорідності породи.

Остаточні висновки про можливість збільшення відстані між шпурами можуть бути зроблені тільки після проведення експериментальних досліджень.

РОЗДІЛ IV

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ КЕРОВАНОГО ТРІЩИНОУТВОРЕННЯ В МОДЕЛЯХ З ВИКОРИСТАННЯМ НРС ТА АГРЕГАТУ З ПЛАСТИНОЮ-ВСТАВКОЮ

4.1. Обґрунтування основних вимог до пластин-вставок

Враховуючи, що міцні породи, згідно з даними, наведеними в роботі [117], мають напруження тріщиноутворення порядку 40 МПа. Таким чином, перша вимога до технологічного обладнання для створення статичного навантаження в шпурах полягає в здатності забезпечити тиск до 30 МПа.

Друга важлива вимога до технологічного обладнання полягає в гарантуванні його надійної та довгострокової роботи в середовищі з високою концентрацією абразивного пилю, який у великій кількості утворюється при бурінні шпурів твердосплавним інструментом. Слід зазначити, що склад цього пилю включає в себе пилові частки різного розміру.

До третьої важливої вимоги слід віднести енергозберігаючі характеристики обладнання для створення статичних навантажень в шпурах, а також здатність гарантувати екологічність технологічного процесу. Для забезпечення технології статичного навантаження шпурів повинна базуватися на зменшенні шкідливих для оточуючого середовища компонентів, таких, наприклад, як нафтопродукти в гідросистемах, вибухових речовин.

Наступною вимогою до обладнання є мінімальні габарити та маса, які гарантують ручне транспортування останнього по кар'єру та виключають використання підйомно-транспортних машин, які мають електропривод, або привод від двигунів внутрішнього згоряння.

Обов'язковою умовою є простота конструкції обладнання для статичного навантаження шпурів, що гарантує можливість його самостійного виготовлення безпосередньо в умовах ремонтного цеху, або майстерні на кар'єрі.

Враховуючи, що в наш час в Україні працює багато [27] невеликих кар'єрів з об'ємом видобутку кам'яних блоків 5000-7000 м³ на рік і їх фінансові можливості часом обмежені, треба гарантувати незначну ціну пластин-вставок. Ця вимога гарантує підвищення економічних показників виробництва.

4.2. Розробка конструкцій експериментальних агрегатів з керуючими пластинами

Детальний аналіз проведених експериментів вказав на можливість розробки пластин-вставок для утворення направлених тріщин в свердловинах.

Автором були розроблені три корисні моделі [97 - 99], які стосуються гірничої галузі, а саме видобутку кам'яних блоків за допомогою НРС.

Всі пристрої корисних моделей базуються на створенні конструктивним методом з допомогою пластин – вставок штучних концентраторів напружень, які визначають напрямок тріщини відколу, який співпадає з поперечною віссю пластини – вставки. Вище зазначалося що обов'язковою умовою є простота конструкції обладнання для статичного навантаження шпурів, що гарантує можливість його самостійного виготовлення безпосередньо в умовах ремонтного цеху, або майстерні на кар'єрі. Виходячи з цієї вимоги для експериментально – промислового розколу був вибраний пристрій [97] (рис 4.1). Слід зауважити, що при виготовленні пластин – вставок їх повздовжні торці заокруглювалися. Радіус заокруглення дорівнював радіусу шпуру. Це зменшувало можливість виникнення подряпин стінок шпуру при встановленні пластин – вставок і створенні паразитних мікроконцентраторів напружень і збільшувало якість площини відколу.

На фігурі (Рис. 4.1) представлена запропонована конструкція шпурової вставки. Пристрій включає в себе пластину 1, яка розташована вздовж осі шпура 2, який заповнюється НРС. К торцям 3 та 4 пластини 1 приварені шайби 5 та 6 діаметр яких обирається по діаметру шпура 2. На шайбі 6 виконаний бурт 7, який забезпечує фіксацію шпурової вставки у верхній частині шпура 2.

Таким чином пластина – вставка 1 разом з шайбами 5 та 6 утворюють дві

замкнених і рівних по об'єму порожнини шпура 2.

Напрямок розколу монолітного об'єкту задається поворотом пластини 1 навкруги осі шпура 2.

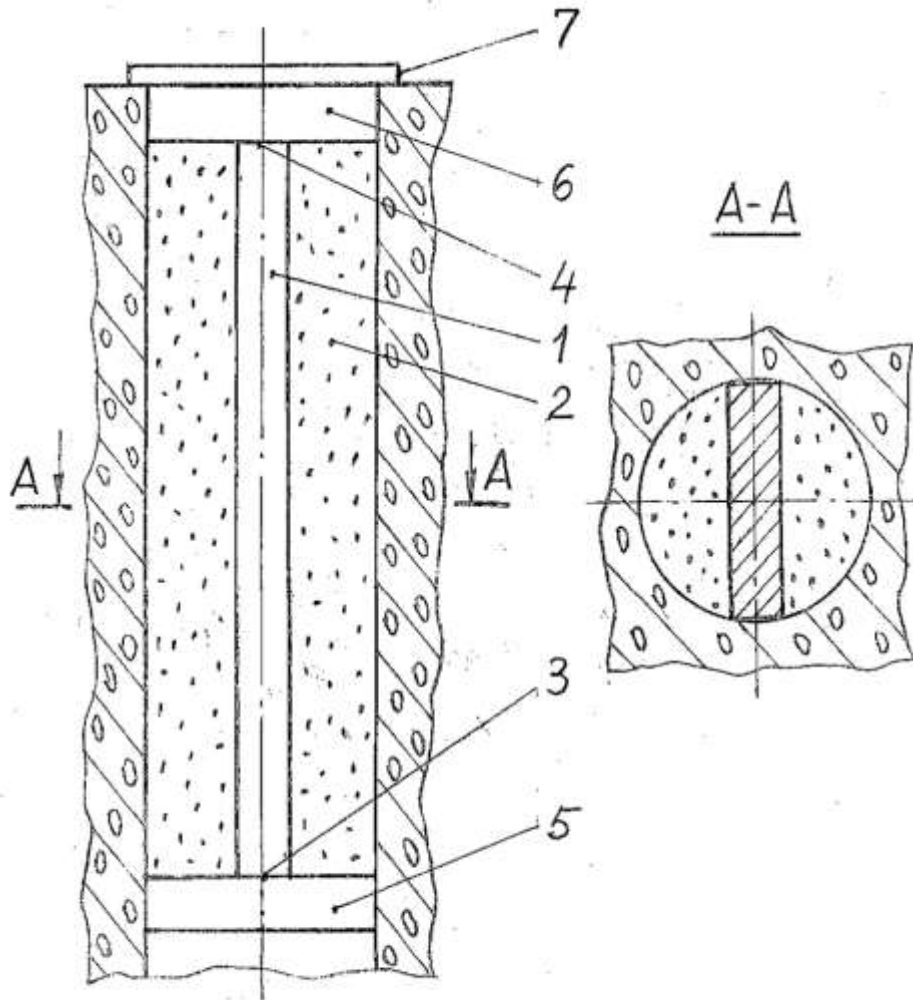


Рис. 4.1. Конструкція шпурової вставки.

Другий пристрій (рис 4.2) також відноситься до гірничої справи і може бути використаний для відділення блоків від масиву, видобутку коштовної кристалічної сировини і будівельного каменю, розробки старих споруд і розколювання негабаритів. В основу корисної моделі поставлена задача удосконалити попередній пристрій шляхом використання додаткових конструктивних елементів, що забезпечить можливість попереднього стискування НРС до початку процесу кристалізації.

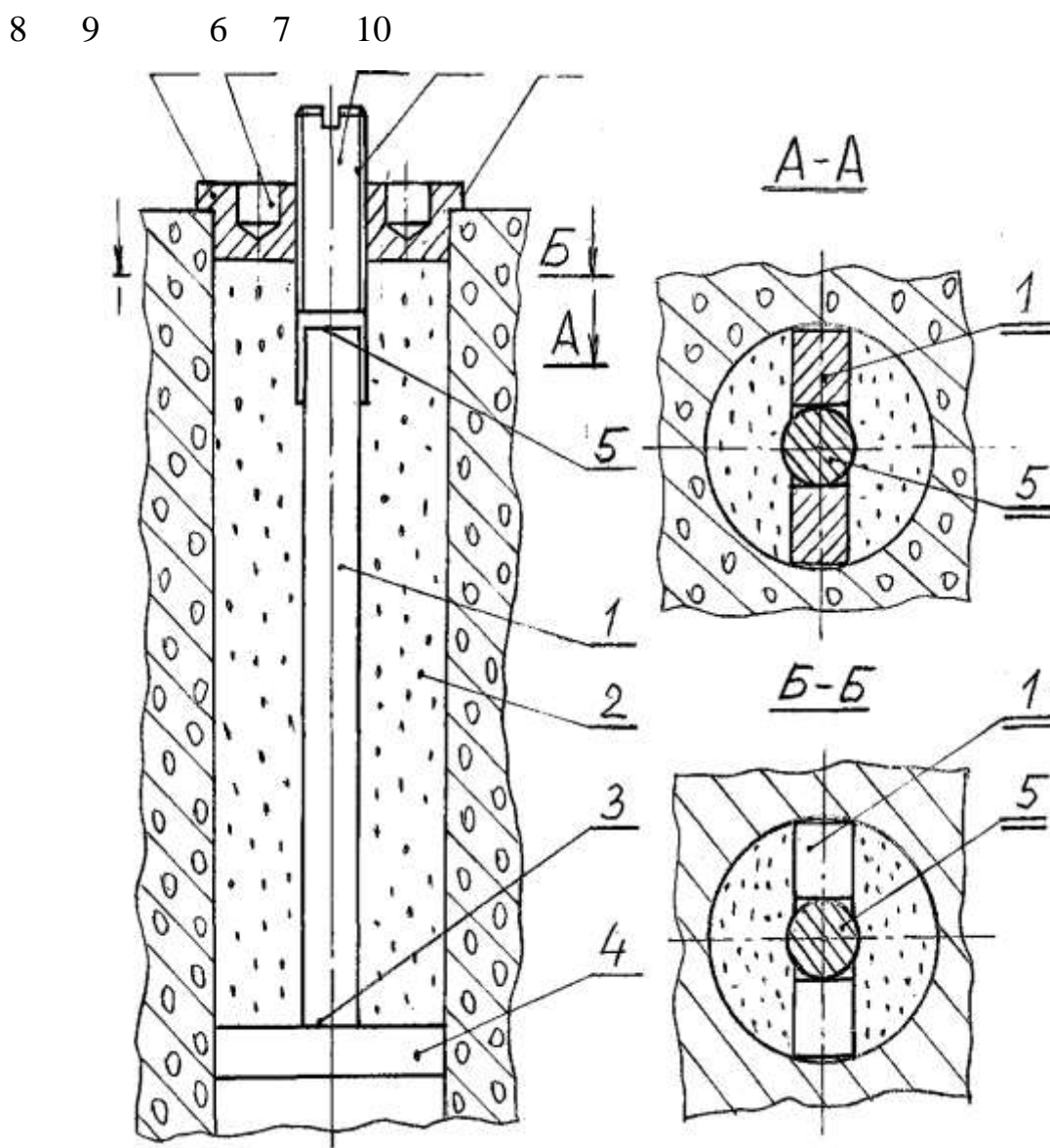


Рис.4.2 Конструкція шпурової вставки.

Поставлена задача вирішується тим, що шпурова вставка для направленого розколу монолітних об'єктів НРС, що містить металеву пластину - вставку, до одного торця якої приварена шайба, діаметр якої дорівнює діаметру шпура, згідно з корисною моделлю [97] новим є те, що зі сторони другого торця пластини приварена шпилька з різьбою, на яку може накручуватися друга шайба, діаметр якої теж дорівнює діаметру шпуру і на торці якої виконані два глухих отвори для встановлення спеціального гайкового ключа.

Пристрій включає в себе пластину 1, яка розташована вздовж вісі шпура 2, який заповнюється НРС. До торця 3 пластини -вставки приварена шайба 4, діаметр якої обирається по діаметру шпура 2.

Зі сторони торця 5 пластини - вставки 1 приварена шпилька 6 з різьбою 7. На різьбу 7 може накручуватися шайба 8, діаметр якої дорівнює діаметру шпуру 2, а на торці виконані два глухих отвори 9 для встановлення спеціального гайкового ключа.

На втулці 8 виконаний бурт 10 для фіксації втулки в верхній частині шпура.

При накручуванні шайби 8 на шпильку 6 має місце стискання НРС в порожнині шпурів 2. Напрямок розколу монолітного об'єкту задається поворотом пластини - вставки 1 навкруги вісі шпура 2.

На рис.4.3 розроблена конструкція шпурової пластини вставки пристрій [98] також відноситься до гірничої справи і може бути використаний для відділення блоків від масиву, видобутку кошовної кристалічної сировини і будівельного каменю, розробки старих споруд і розколювання негабаритів. В основу корисної моделі поставлена задача удосконалити попередній пристрій шляхом використання додаткових конструктивних елементів, що забезпечить можливість попереднього стискання НРС до початку процесу кристалізації. Недолік аналогу заключається в тому, що шпурова пластина - вставка не забезпечує надійної герметизації порожнини шпуру з НРС. Виробничий досвід показав, що твердосплавні пластини бурової коронки, якою бурять шпур на практиці швидко втрачають свій розмір із-за абразивного зносу і діаметр шпуру збільшується (наприклад, з 40 мм до 41 мм). Це явище призводить до втрат НРС при її попередньому стисканні і не дозволяє отримати максимально можливий тиск під час кристалізації суміші. Саме повна герметизація порожнини шпуру гарантує інтенсифікацію технологічного процесу. В основу корисної моделі поставлена задача удосконалити відомий пристрій шляхом використання додаткових конструктивних елементів, що забезпечують повну герметизацію порожнини шпуру, як під час попереднього стискання НРС, так і в подальшому при кристалізації суміші. Поставлена задача вирішується тим, що шпурова пластина - вставка для направленої розколу монолітних об'єктів НРС, до одного торця якої приварена шайба, діаметр якої дорівнює діаметру шпуру, а зі

сторони другого торця пластини - вставки приварена шпилька з різьбою, на яку може накручуватися друга шайба, діаметр якої теж дорівнює діаметру шпуру. Згідно з корисною моделлю новим є те, що в кожній шайбі встановлені пружні ущільнення, які притискаються до стінки шпуру за рахунок попереднього стискання НРС і в подальшому збільшують силу притискання до стінки шпуру по мірі кристалізації суміші та збільшення тиску в шпурі. На фігурі 4.3 представлена запропонована конструкція шпурової платини - вставки. Пристрій включає в себе пластину- вставку 1, заповнюється НРС. До торця 3 пластини - вставки приварена шайба 4, діаметр якої дорівнює діаметру шпуру, який залежить від допустимого зносу твердосплавних пластин бурової коронки. В шайбі 4 встановлено ущільнення 5. Зі сторони торця 6 пластини - вставки 1 приварена шпилька 7 з різьбою. На різьбу 8 може накручуватись шайба 9, діаметр якої дорівнює мінімальному діаметру шпуру. В шайбі 9 встановлено ущільнення 10, а на торці виконані два глухих отвори 11 для гайкового ключа . Бурт 12 на втулці призначений для фіксації втулки в верхній частині шпуру. При накручуванні шайби 9 на шпильку 7 починається стискання НРС в порожнині шпуру 2, що визиває попереднє притискання ущільнень 5 та 10 до стінки шпуру 2. Остаточне притискання ущільнень 5 та 10 до стінки шпуру 2 відбувається при суттєвому зростанні тиску в шпурі під час протікання хімічної реакції та кристалізації НРС (поз. Б - Б). Таким чином гарантується повна герметизація порожнини шпура 2 і за рахунок цього підвищення робочого тиску.

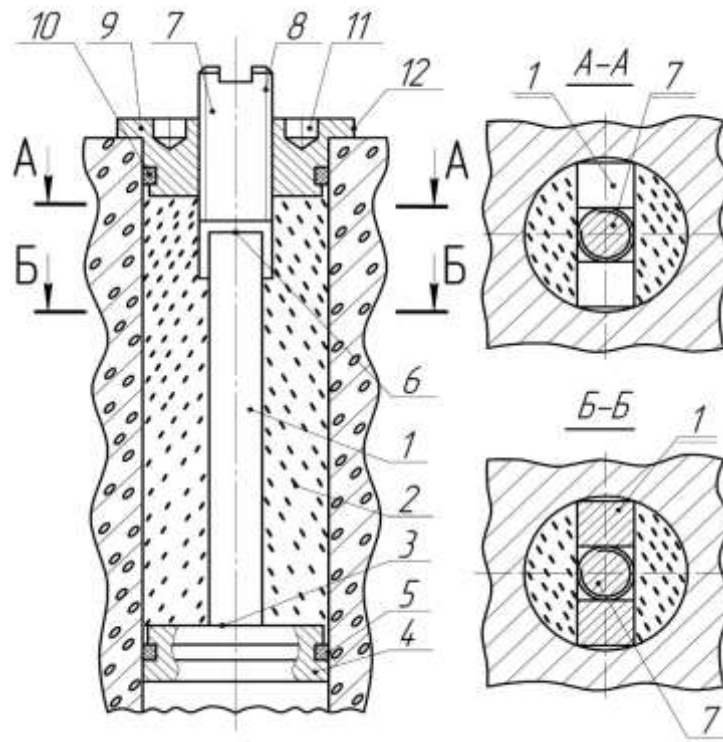


Рис. 4.3 Конструкція шпурової вставки

4.3. Особливості деформування моделі шпура з НРС та пластиною-вставкою

Необхідність використання саме сталеві труби для дослідження нерівномірності навантаження за допомогою НРС циліндричної порожнини (умовного шпура) з пластиною-вставкою пояснюється тим, що заміряти напруження, або деформації в середині реального шпура, виконаного в бетоні, або в природному масиві, досить проблематично, оскільки розташування в шпурі з твердою застиглою НРС необхідні прилади практично неможливо.

Використання сталеві труби, що заповнена НРС дає можливість заміряти нормальні прогини в її поперечному перетині та отримати якісну картину процесу деформування [118].

Необхідність експериментального аналізу залежності співвідношення нормальних прогинів сталеві труби від товщини пластини-вставки пояснюється наступним:

1. Товщина пластини – вставки впливає на співвідношення мінімального та максимального напруження (нормальних прогинів) на стінках шпура у різних

напряжках, що в свою чергу пов'язано з вірогідністю тріщиноутворення в заданому напрямку.

2. Аналітичні дослідження показали, що в породах з неоднородними властивостями потрібний напрямок тріщиноутворення не завжди можна задавати за рахунок орієнтації пластини-вставки, а й за рахунок правильного вибору її товщини, яка впливає на відношення мінімальних до максимальних напружень і нормальних прогинів в перетині шпура. Тому виникла необхідність порівняти співвідношення напружень, отриманих в аналітичних дослідженнях, з співвідношеннями нормальних прогинів, отриманих при експериментальних дослідженнях.

Експерименти проводились на лабораторній установці з двома індикаторами переміщень, кожен з яких заміряв нормальні прогини сталеві труби по одній з двох осей перетину, одна з яких співпадає з напрямком розташування пластини-вставки. Загальний вигляд установки представлений на (рис.4.5).

Остаточний замір нормальних прогинів проводився після закінчення хімічної реакції кристалізації НРС.

Загальний вигляд деформованої труби після закінчення експерименту представлено на (рис.4.4).

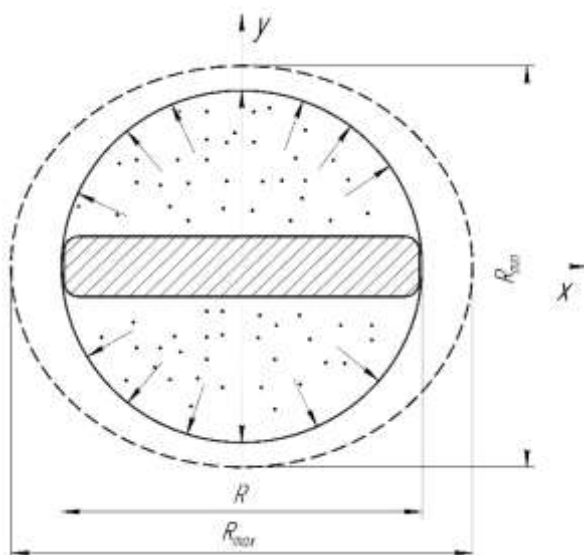


Рис. 4.4. Деформація труби з НРС та пластиною-вставкою.

Проведені заміри нормальних прогинів на осях перетину труби з використанням пластин-вставок товщиною 5; 6; 7 та 8 мм. Техніка експериментів з пластинами-вставками представлена на (рис.4.5).



Рису. 4.5. Забір нормальних прогинів по осях перетину труби при розташуванні в трубі з НРС пластини-вставки різної товщиною 5 мм

Результати лабораторних експериментів зведені в (табл. 4.1).

Таблиця 4.1

Результати лабораторних експериментів

Параметри труб	Нормальні прогини при заданій товщині пластин-вставок			
	5	6	7	8
Товщина пластини-вставки h , мм	5	6	7	8
Мінімальний приріст розміру труби по осі $Y, \Delta R_y$, мк	11,2	9,2	7,5	6,8
Максимальний приріст розміру труби по осі $X, \Delta R_x$, мк	13	12,6	12,3	12
Співвідношення мінімального приросту до максимального	0,86	0,73	0,63	0,57

В кінці наведеної частини лабораторних досліджень проведено порівняння співвідношення мінімальних та максимальних розтягуючих напружень, виникаючих на осях перетину шпура при різних товщинах пластин-вставок та співвідношення

мінімальних та максимальних нормальних прогинів на осях перетину труби при тих же товщинах пластин-вставок .

Результати порівняння наведено на графіках, рис. 4.6.

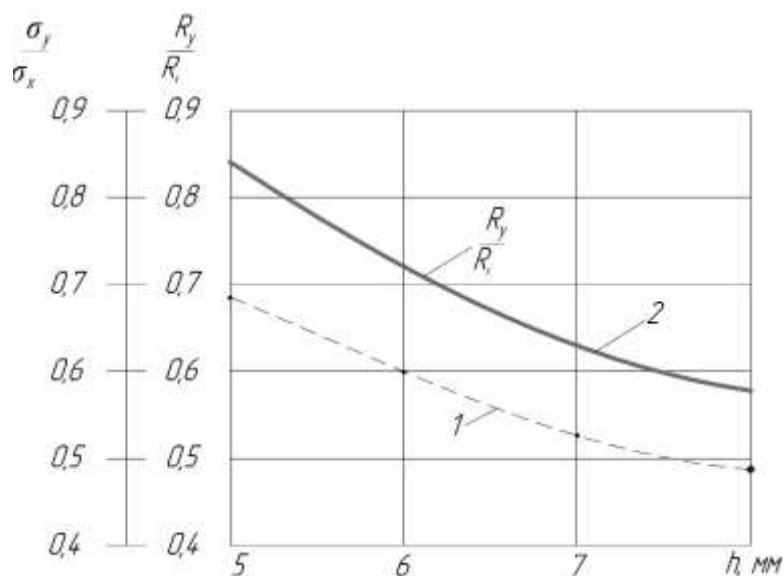


Рис. 4.6. Вплив товщини пластин-вставок на співвідношення мінімальних та максимальних розтягуючих напружень на стінках шпура в гірських породах (1) та на співвідношення мінімальних та максимальних нормальних прогинів металевої труби (2).

Представлені на (рис. 4.6) результати досліджень дозволяють зробити наступні висновки:

1. Як співвідношення мінімальних та максимальних розтягуючих напружень, в породі, так і співвідношення мінімальних та максимальних нормальних прогинів стінок труби мають спільну тенденцію до зменшення при збільшенні товщини пластини-вставки, що дозволяє стверджувати про збільшення вірогідності тріщиноутворення у наперед заданому напрямі для пластин більшої товщини.

2. Для гірських порід на напрямок тріщиноутворення в комплексі впливають наступне:

- величина анізотропії;
- товщина пластини-вставки (співвідношення мінімального та максимального розтягуючого напруження).
- орієнтація пластини-вставки відносно лінії відколу .

Слід зазначити, що другий висновок має бути підтверджений подальшими експериментальними дослідженнями.

Проведені в розділі 2 теоретичні дослідження напруженого стану в перетині шпурів і виконаних в різних гірських породах, при використанні пластин-вставок, а також отримані в розділі 3 результати лабораторних дослідів з вивчення деформованого стану на перетині сталевих цільнотягнутих труб з пластинами-вставками дали можливість прогнозувати напрям тріщиноутворення в шпурі, який повинен співпадати з напрямом розташування пластини-вставки в перетині шпура.

Місця виникнення мінімальних та максимальних розтягуючих напружень, які мають ініціювати тріщиноутворення в шпурі по торцях пластини-вставки, представлені на (рис.4.7) [119,120].

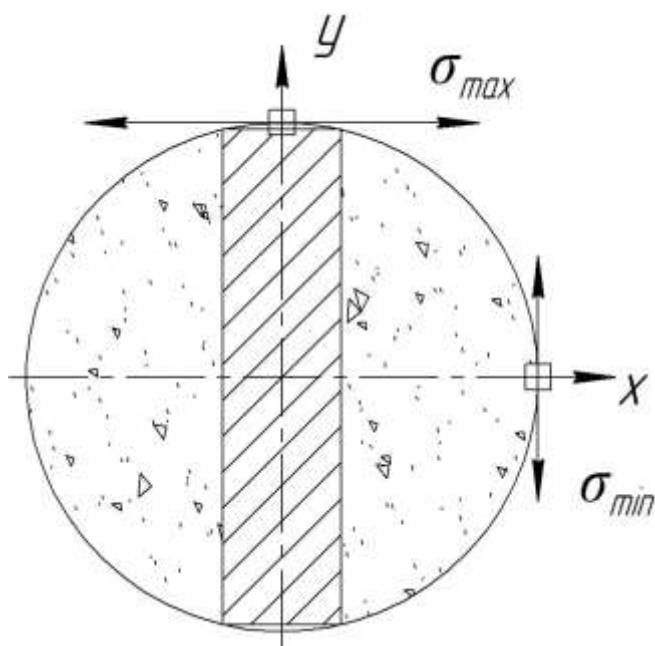


Рис. 4.7. Місця виникнення максимальних та мінімальних розтягуючих напружень

На рис.4.8. наведені форми епюр розтягуючих напружень при використанні пластин товщиною 8 та 5 мм.

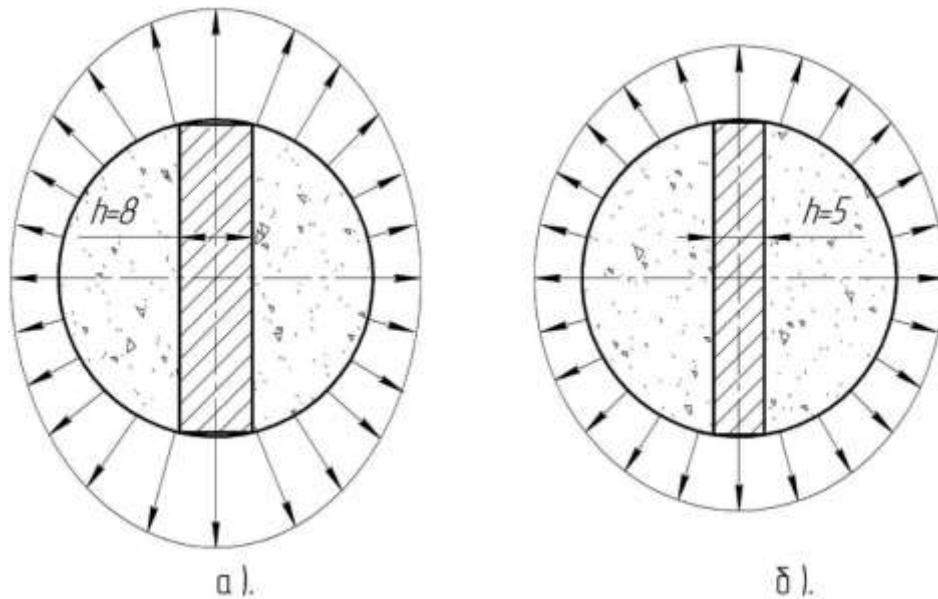


Рис. 4.8. – Епюра розтягуючих напружень в перетині шпурів з пластинами-вставками, де: а – товщина пластини-вставки 8 мм. б – товщина пластини-вставки 5 мм.

4.4. Лабораторні дослідження тріщиноутворення в модельних матеріалах

В розділі описані отримані особливості геометрії тріщин розколу бетонних моделей (циліндричні блоки діаметром $D = 310$ мм, висота $H = 450$ мм, радіус шпура $R = 20$ мм), які пов'язані з товщиною пластин-вставок (5; 6; 7 та 8 мм.). Ці особливості залежать від співвідношень мінімальних та максимальних розтягуючих напружень. При мінімальних значеннях деякого співвідношення (0,48 для пластини товщиною 8 мм) ступінь нерівномірності навантаження в площині перетину шпура в різних напрямках позитивно впливає на «якість» геометрії тріщини-розколу.

При максимальних значеннях цього співвідношення (0,67 для пластин товщиною 5 мм) ступінь нерівномірності навантаження перетину шпура в різних напрямках негативно впливає на «якість» геометрії тріщини-розколу.

За критерій «якості» геометрії тріщини розколу була обрана сума відхилень A_1 та A_2 кінців тріщини від осі Y , по якій була встановлена пластина-вставка. Схему розташування відхилень кінців тріщини розколів A_1 та A_2 наведено на рис.4.9.

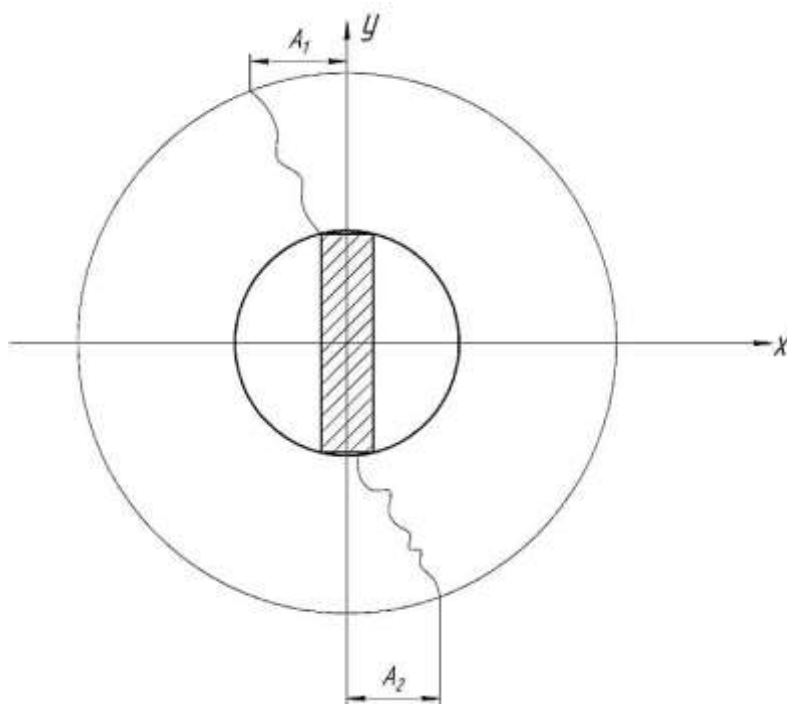


Рис. 4.9. Відхилення кінців тріщини розколів A_1 та A_2 від осі Y .

На рис.4.10 та 4.11 представлені відхилення кінців тріщини розколів A_1 та A_2 отримані при використанні пластин-вставок товщиною 5 та 8 мм.



Рис. 4.10. Параметри A_1 та A_2 при застосуванні пластин-вставок товщиною

$$5 \text{ мм} \left(\frac{A_1 + A_2}{2} = 33 \text{ мм.} \right)$$



Рис. 4.11. Параметри A_1 та A_2 при застосуванні пластин-вставок товщиною 8 мм

$$\left(\frac{A_1 + A_2}{2} = 26 \text{ мм.}\right)$$

На базі проведених лабораторних досліджень отримана залежність «якості» геометрії тріщини розколу від товщини пластини-вставки, яка наведена на рис.4.11.

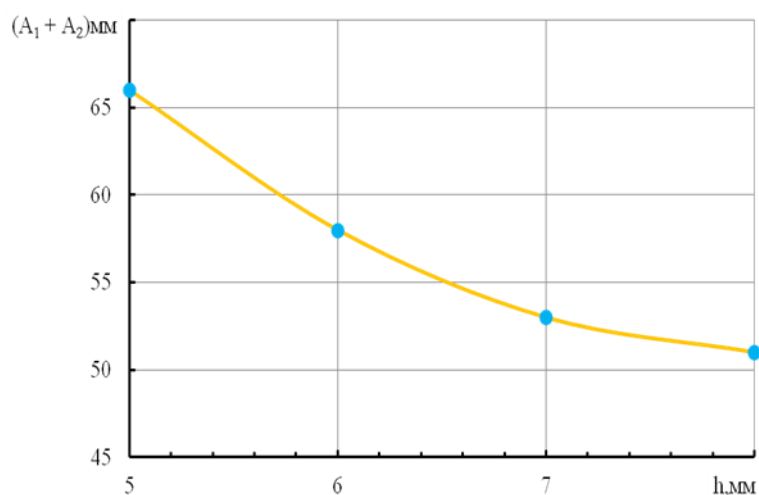


Рис. 4.12. Залежність «якості» геометрії тріщини розколу від товщини пластини вставки. Написати значення h .

Залежність наведена на рис.4.12 дозволяє зробити наступні висновки :

– максимальна «якість» геометрії тріщини розколу (мінімальні відхилення кінців тріщини розколу від осі Y) має місце при використанні пластини–вставки з найбільшою товщиною, що дорівнює 8 мм.

– мінімальна «якість» геометрії тріщини розколу(максимальні відхилення кінців тріщини розколу від осі Y) має місце при використанні пластини–вставки з найменшою товщиною, що дорівнює 5 мм.

Слід зазначити, що «якість» геометрії тріщини розколу не завжди може бути головним технологічним параметром при видобутку кам'яних блоків[121-123]. Наприклад, при видобутку граніту для отримання щебеню «якість» геометрії тріщини розколу не буде домінуючим фактором. В цьому випадку можливо використати пластини–вставки з мінімальною товщиною (5 мм.). Це дасть можливість збільшити об'єм НРС в шпурі і за рахунок цього збільшити ширину тріщини розколу. Саме ця ширина впливає, наприклад, на технологічність використання на кар'єрі підйомно-транспортних машин, що пов'язано з собівартістю виробленої продукції. Тому для оптимального вибору товщини пластини-вставки необхідно в комплексі враховувати цілий ряд конкретних технологічних вимог.

Проведення даних експериментів була розроблена технологія отримання бетонних моделей з неоднорідними властивостями. Враховуючи результати теоретичних досліджень, були виготовлені бетонні моделі з відношеннями порядку 0,6; 0,65; 0,7 та 0,8. При цьому для експериментів застосовувались агрегати з пластинами-вставками товщиною 5; 6; 7 та 8 мм.

Враховуючи, що в задачу даної серії експерименту входило вивчення керування напрямом трищіноутворення тільки по двом осям неоднорідності, а не в секторі між ними, було вирішено зробити для цього бетонні моделі зі спрощеною неоднорідністю.

Для цього моделі включали в себе дві пари секторів по 90° . Розташування пар секторів з максимальною та мінімальною міцністю представлені на рис.4.13.

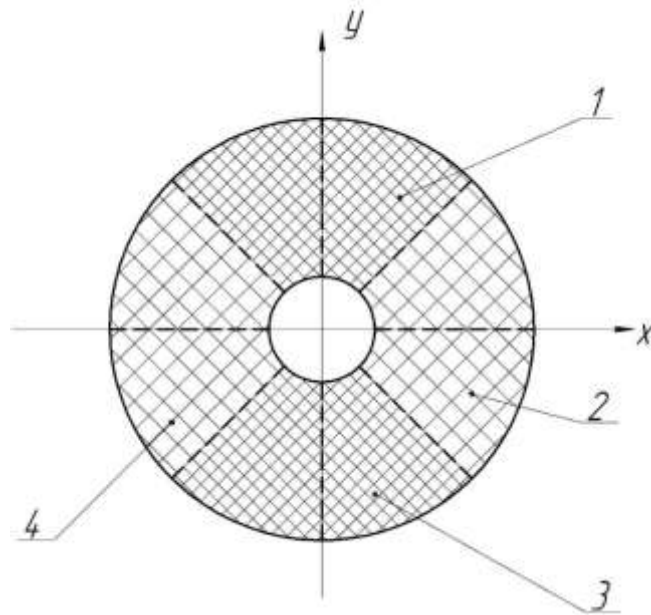


Рис. 4.13. Перетин бетонної моделі з секторами максимальною та мінімальною міцністю, де: 1 та 3 – сектори з максимальною міцністю; 2 та 4 – сектори з мінімальною міцністю

Для отримання секторів з різною міцністю в форму для заливки моделей вставлялись перегородки, які виймалися одразу після заливання суміші. При цьому в сектори 1 та 3 заливалася суміш з максимальною концентрацією цементу, а в сектори 2 та 4 суміш з меншою концентрацією, конкретна величина якої залежала від заданої наперед неоднорідності (0,6;0,65;0,7 та 0,8).



а

б

Рис. 4.14. а – тріщиноутворення по осі X (серія експериментів №1); б – відсутність керування напрямком тріщино утворення (серія експериментів №2)

Програма цього етапу лабораторних досліджень наведена в табл.4.2.

Таблиця 4.2

Програма етапу лабораторних досліджень

Результати експериментів	№ серії експериментів	Чисельне значення неоднородності порід	Товщина пластини-вставки, мм	Співвідношення мінімальних напружень до максимальних	Вісь для орієнтації пластини-вставки
Тріщиноутворення по осі X	1	0,6	5	0,67	Y
Керування напрямком тріщиноутворення відсутнє	2	0,65	5	0,67	Y
Керування напрямком тріщиноутворення відсутнє	3	0,6	6	0,60	Y
Тріщиноутворення по осі Y	4	0,7	7	0,54	Y
Тріщиноутворення по осі Y	5	0,8	8	0,48	Y
Тріщиноутворення по осі X	6	0,6	8	0,48	X

Примітка: 1. Вісь Y – максимальна міцність; 2. Вісь X – мінімальна міцність
Результати проведених експериментів представлені на рис.4.13 – 4.16



Рис. 4.15. Відсутність керування напрямком тріщиноутворення (серія експериментів №3)



а

б

Рис.4.16. Тріщиноутворення по осі Y : а - серія експериментів №4; б - серія експериментів №5



Рис. 4.17. Тріщиноутворення по осі X (серія експериментів №6)

Висновки до розділу

Проведений комплекс лабораторних експериментів, наведений в даному розділі, дозволяє сформулювати наступні висновки:

- експериментально визначено потенційну здатність НРС, яка могла створювати тиск $P \leq 40\text{МПа}$ і використовувалася в досліді в цільнотягнутих циліндричних сталевих трубах діаметром $D = 40\text{мм}$ з використанням пластин – вставок;

- доведено правильність розробленої в розділі 2 теоретичної методики керування напрямом тріщиноутворення з допомогою пластин – вставок ;

– одержана експериментальна залежність «якості» геометрії тріщини розколу від товщини пластини – вставки: 10,6% при $h = 5$ мм і 8,4% при $h = 8$ мм;

– експерименти довели, що при близьких значеннях неоднорідності та співвідношеннях мінімальних та максимальних розтягуючих напружень, можлива відсутність керування напрямком тріщиноутворення, що на практиці означає виникнення тріщин одразу по двох осях неоднорідності;

– проведені експерименти дозволили визначити умови для технологічних параметрів, які забезпечують тріщиноутворення по необхідній осі (табл. 4.2).

РОЗДІЛ V

ВИПРОБУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ СПОСОБУ В ПРОМИСЛОВИХ УМОВАХ

5.1. Промислові дослідження методу керування напрямом розколу декоративного каменю

Проведені теоретичні дослідження довели, що для керування напрямом розколу породи необхідно враховувати напрямок орієнтації пластини в шпурі.

Кут, як було доведено в теоретичних дослідженнях, залежить від наступних параметрів:

- чисельного значення відносної міцності породи, яке визначається як співвідношення мінімальної міцності породи на розтягування до максимальної міцності;

- товщини пластини- вставки h , яка впливає на співвідношення мінімальних напружень на розтягування на стінці шнура, до максимальних напружень, що виникають в процесі розвитку реакції НРС,

- величини заданого наперед кута тріщиноутворення α .

Для проведення промислових випробувань розробленої технології були обрані наступні початкові умови:

- габарити блоків: висота 0,9 - 1,1 м; ширина 1,3 - 1,6 м; довжина 2,5 - 2,7 м;
- глибина шнурів дорівнює 0,8 висоти блоку;
- діаметр шнурів 40 мм;
- задані кути тріщиноутворення $\alpha = 30^\circ, 45^\circ$ та 60° ;
- висота пластин 0,6 м;
- товщина пластин $h = 5; 6; 7$ та 8 мм;
- кількість агрегатів для розколу породи - 5 шт;
- температура оточуючого середовища коливається в діапазоні від $+14^\circ\text{C}$ до $+18^\circ\text{C}$.

На рис. 5.1, 5.2 та 5.3 приведено схеми технологічних кутів для тріщиноутворення під заданим кутом 30° ; 45° та 60° . Наведені схеми передбачають використання керуючих пластин-вставок товщиною 6 мм.

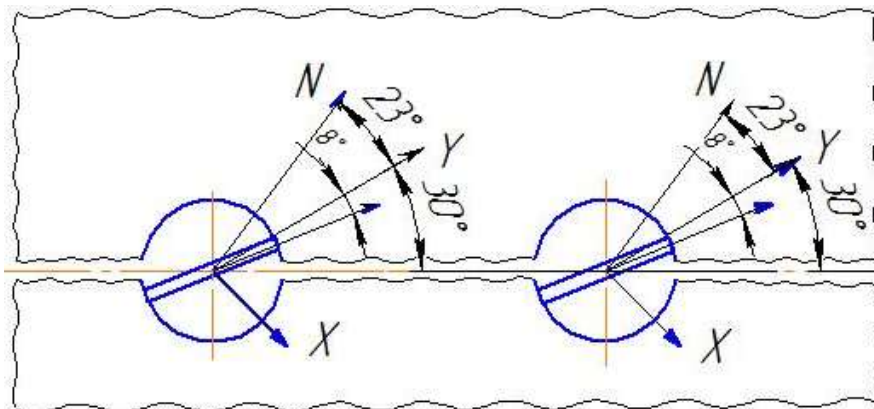


Рис. 5.1. Схема технологічних кутів для тріщиноутворення під кутом 30°

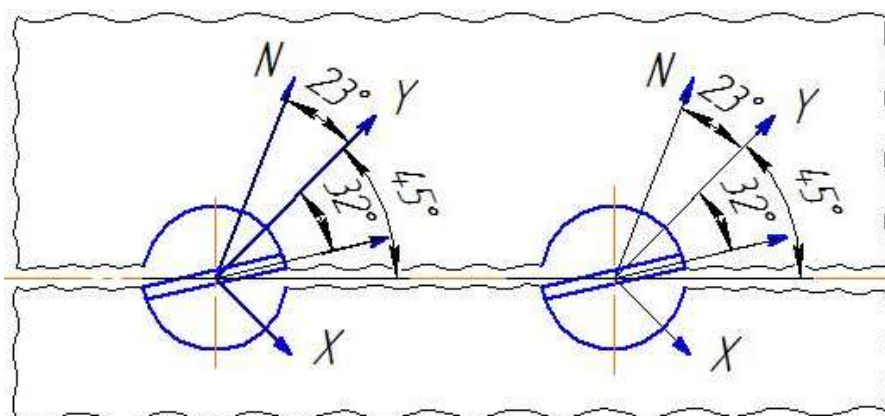


Рис. 5.2. Схема технологічних кутів для тріщиноутворення під кутом 45°

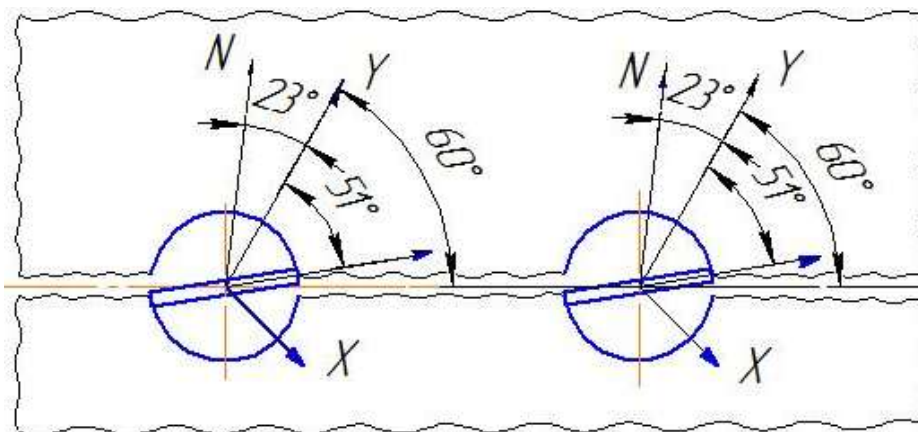


Рис. 5.3. Схема технологічних кутів для тріщиноутворення під кутом 60°

На рис. 5.4; 5.5 та 5.6 представлено реальні результати промислових випробувань з керування напрямом тріщиноутворення під заданими наперед кутами 30° ; 45° та 60° .

Результати промислових випробувань зведені в табл. 5.1. В таблиці наведено отримані на практиці мінімальні та максимальні кути тріщиноутворення при різних початкових умовах, що дало можливість проаналізувати фізичні процеси, які впливають на точність керування заданим напрямом тріщиноутворення.

Для аналізу факторів, що впливають на точність керування заданим напрямом тріщиноутворення, виникла необхідність ввести поняття інтенсивної зони навантаження стінки шнура в районі передбаченого тріщиноутворення. Була прийнята умова, що зона інтенсивного навантаження стінки шнура, - це зона, де розтягуючі напруження складають діапазон $0,95 - 1,05$ від межі міцності породи в місці наміченого тріщиноутворення.

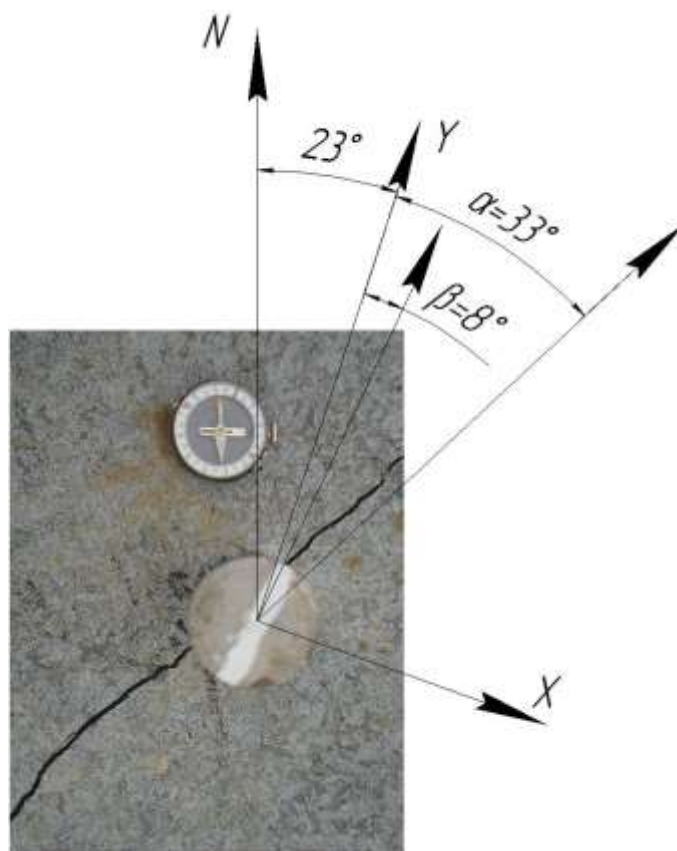


Рис. 5.4. Тріщиноутворення в блоці природного каменю під кутом порядку 30° від осі Y

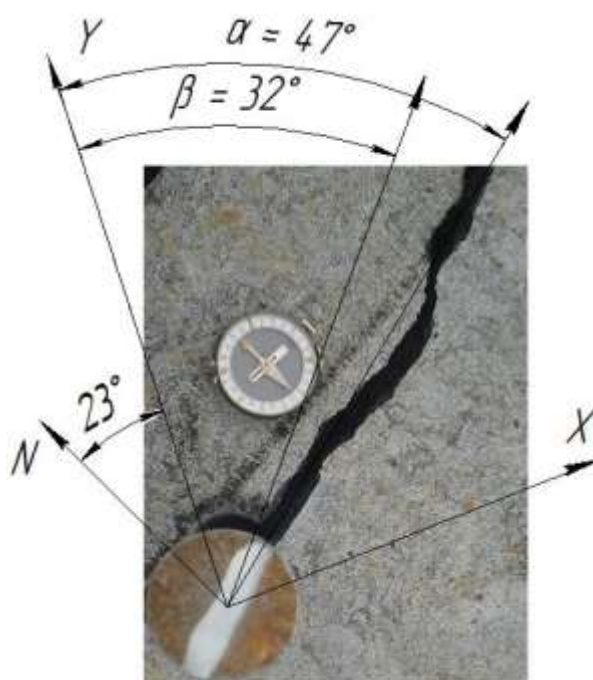


Рис. 5.5 Тріщиноутворення в блоці природного каменю під кутом порядку 45° від осі Y

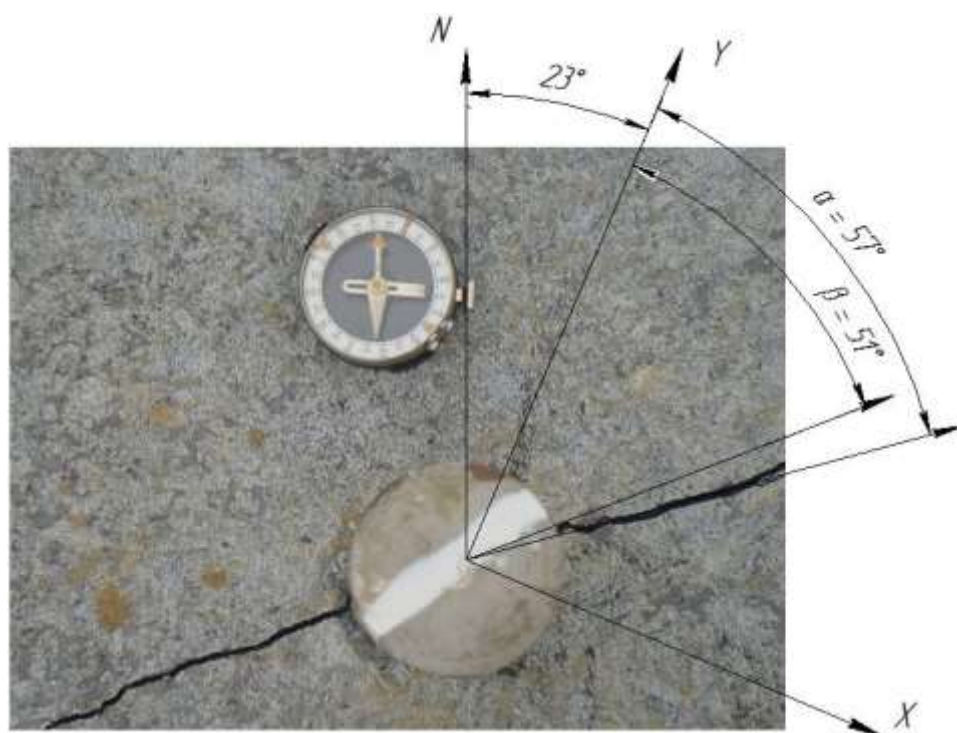


Рис. 5.6. Тріщиноутворення в блоці природного каменю під кутом порядку 60° від осі Y

Саме ширина цієї зони впливає на точність керування заданим напрямом тріщиноутворення. Ця ширина формується в залежності від двох еліпсів в місці їх

дотику, де повинно відбутися тріщиноутворення. При цьому геометрія зовнішнього еліпсу залежить від властивостей породи, а геометрія внутрішнього еліпсу залежить від товщини пластини, яка розміщується в шнурі НРС. Саме ця товщина визначає співвідношення мінімальних та максимальних розтягуючих напружень, які виникають на стінці шнура.

Таблиця 5.1.

Результати проведених промислових випробувань.

Товщина пластини, h, мм	Співвідношення мінімальних напружень до максимальних, $\sigma_{\min}/\sigma_{\max}$	Заданий кут тріщиноутворення, α	Отриманий мінімальний кут тріщиноутворення, α_{\min}	Отриманий максимальний кут тріщиноутворення, α_{\max}
5	0,67	30°	22°20′	37°10′
		45°	39°10′	51°20′
		60°	55°10′	65°40′
6	0,60	30°	23°30′	36°50′
		45°	39°40′	50°40′
		60°	56°00′	64°10′
7	0,54	30°	23°50′	35°50′
		45°	40°10′	50°00′
		60°	56°20′	64°00′
8	0,48	30°	24°20′	35°20′
		45°	40°40′	49°40′
		60°	57°00′	63°40′

Результати проведених промислових випробувань, наведені в табл. 5.1, дозволяють сформулювати наступні висновки:

1. Збільшення товщини пластини підвищує точність керування напрямом тріщиноутворення.
2. Підвищення заданого кута тріщиноутворення також підвищує точність керування напрямом тріщиноутворення.

5.2. Відпрацювання в промислових умовах параметрів шпурів в системі

При розробці методики проведення експериментів із збільшення відстані між шпурами при використанні пластин-вставок були враховані результати робіт [124-127].

Збільшення товщини керуючої пластини-вставки підвищує точність керування напрямком тріщиноутворення, але одночасно пластина-вставка з максимальною товщиною 8 мм значно зменшує об'єм НРС в шпурі, а саме на 26 %, що негативно впливає на запас енергії суміші, а тому відчутно зменшує ширину тріщини розколу.

Пластина-вставка з мінімальною товщиною 5 мм зменшує точність керування напрямом тріщиноутворення, але в той же час зменшує об'єм НРС в шпурі всього на 16 %, що позитивно впливає на збільшення ширини тріщини розколу.

Домінуючим фактором для відмови від використання пластини-вставки товщиною 5 мм для проведення експериментів по збільшенню відстані між шпурами був той факт, що для цієї пластини співвідношення розтягуючих напружень по осях X та Y дорівнює 0,67, що дуже близько співпадає з обраною для експериментів породою, яка дорівнює 0,7. В цьому випадку значно підвищується вірогідність, що межі міцності по осях будуть досягатися одночасно і тріщиноутворення одразу буде відбуватися у двох напрямках, як по осі X , так і по осі Y . Саме такий процес був виявлений під час проведення лабораторних експериментів.

Враховуючи наведені вище фактори, для проведення експериментів в промислових умовах був обраний компромісний варіант, а саме пластина-вставка товщиною 7 мм, у якої співвідношення розтягуючих напружень по осях X та Y дорівнює 0,6, суттєво зменшує вірогідність одночасного тріщиноутворення, як по осі X так і по осі Y . Перед проведенням експериментів визначені анізотропні властивості обраної породи. Конкретні значення анізотропії породи для різних кутів тріщиноутворення визначались після аналізу геометрії еліпсу, що дорівнює 0,7. Результати аналізу геометрії наведені на (рис.5.7).

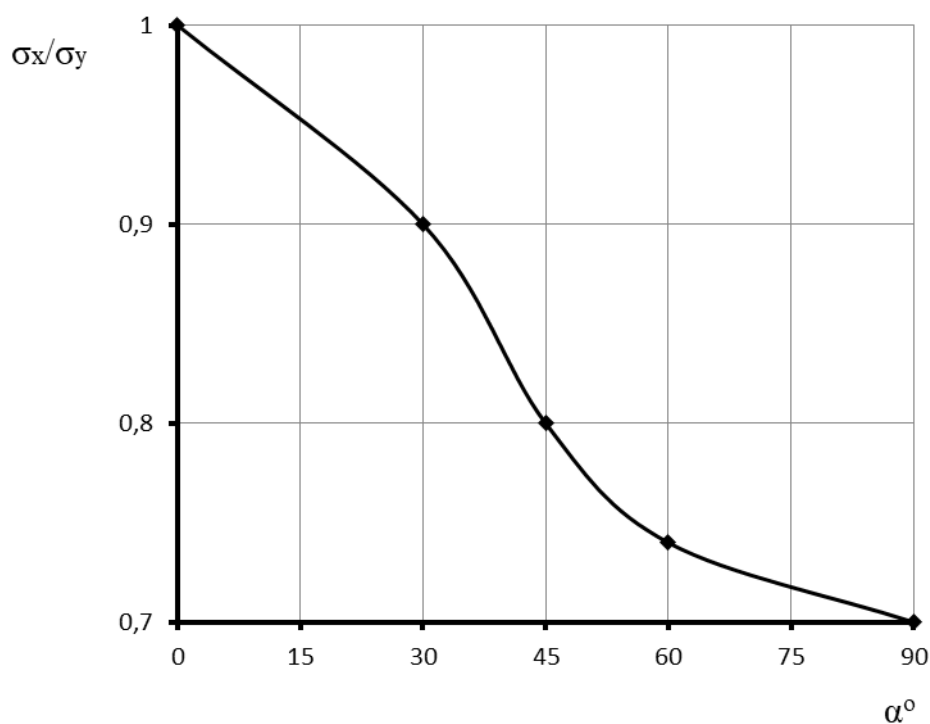


Рис.5.7 . Властивості породи в залежності від кута тріщиноутворення

Перед проведенням експериментів за допомогою аналітичного виразу, наведеного в роботі [115], були розраховані відстані між шпурами, де відсутні пластини-вставки. Результати розрахунків представлені в табл.5.2.

При використанні пластин-вставок було вирішено збільшити відстань між шпурами на 25 % від базового варіанту.

Цифра 25 % обґрунтована слідуючими міркуваннями:

1. Попередні досліді, проведені на Катеринівського кар'єру ПП «Кванта-ЛЧ» (дані 2015 року) при видобування блоків лабрадориту, при наведених початкових умовах довели, що при використанні пластин-вставок збільшення відстані між шпурами на 25 % забезпечує практично у всіх випадках розкол породи.

2. При розколі породи була виставлена умова, щоб ширина тріщини розколу була в межах 3 – 5 мм. Тріщина такої ширини гарантує при наведених початкових умовах (глибина шпурів, висота блоку) отримання тріщини розколу на всю висоту блоку, аж до його підшви.

3. Отримання більшої ширини тріщини розколу свідчить, що частина енергії НРС після повного розколу блоку була використана на переміщення вже розколотих

частин блоку, а тому енергія НРС була використана не оптимально з точки зору збільшення відстані між шпурами з пластинами-вставками.

Таблиця 5.2.

Результати експериментів по збільшенню відстані між шпурами

Кут розколу породи, α°	Анізотропія	Відстань між шпурами, L, см (без пластин)	Відстань між шпурами, L_p , см (з пластинами)	Співвідношення L_p/L
0°	1,00	13,60	17,00	1,25
30°	0,88	15,45	19,30	1,25
45°	0,80	17,00	21,25	1,25
60°	0,73	18,60	23,30	1,25
90°	0,70	19,40	24,30	1,25

Результати експериментів по збільшенню відстані між шпурами з пластинами-вставками в порівнянні з розрахунковими відстанями між шпурами без пластин-вставок наведені в табл.5.2.

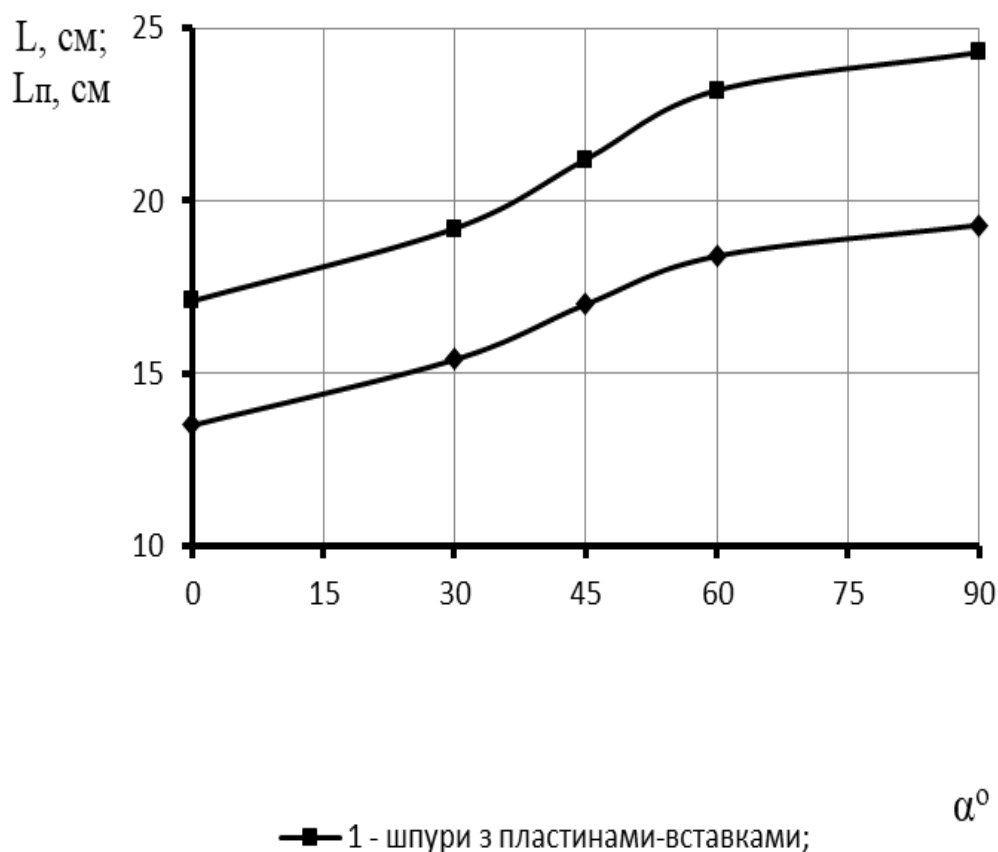


Рис. 5.8. Залежність відстані між шпурами від кута розколу породи:
 1 – шпури з пластинами-вставками; 2 – шпури без пластин-вставок

Слід зазначити, що отримані результати по збільшенню відстані між шпурами з пластинами-вставками відносяться тільки до конкретних перерахованих вище початкових умов. У разі зміни властивостей породи, товщини пластин-вставок питання збільшення відстані між шпурами остаточно може бути вирішено тільки після проведення натурних експериментів, що підтверджується результатами робіт [128 - 132].

Після закінчення промислових випробувань проведено перевірку «якості» тріщини розколу, (рис.5.9).



Рис. 5.9. «Якість» тріщини розколу лабрадориту в промислових умовах.

5.3 Економічна ефективність та техніка безпеки видобутку блоків при впровадженні розроблених технологій та засобів

Економічна ефективність видобутку блоків природнього каменю на сьогоднішній день є актуальною проблемою, виходячи з економічних потреб України. Для промисловості України рівень практичної цінності наукових досліджень встановлюється за економічним ефектом впроваджених результатів досліджень [133 - 135] у виробництво. Економічний ефект досягається декількома шляхами:

- скороченням витрат на виробництво при заданій продуктивності;
- збільшенням продуктивності при заданих витратах, або сукупність першого та другого рішень.

Ефективне застосування невибухових руйнуючих сумішей при видобутку будівельного каменю на кар'єрах може значно скоротити витрати та поліпшити якість видобутої продукції. Прямі витрати пов'язані з такими – витратами робочого (бурового інструменту);

- витратами паливно-мастильних матеріалів або електроенергії;
- нарахуванням заробітної платні.

Непрямі витрати пов'язані з втратами сировини при відокремленні монолітів від масиву, розділенні їх на товарні блоки.

Експлуатаційні витрати розраховувалися за формулою :

$$E_{\text{в}} = n_{\text{п}} * T * z_{\text{п}} + \Sigma (V_{\text{п}} * T_{\text{заг}}) + \Sigma (n_{\text{об}} * T_{\text{заг}} * A) / V_{\text{мон}}, \text{ Грн} / \text{м}^3 \quad (5.1)$$

де: $n_{\text{п}}$ – кількість працівників; T – затрачений час на відкол 1 моноліту, год.; $z_{\text{п}}$ – заробітна плата 1 працівника, $V_{\text{п}}$ – вартість витратних матеріалів, $T_{\text{заг}}$ – загальний час роботи кожної одиниці техніки, год.; $n_{\text{об}}$ - кількість одиниць обладнання; A – витрати на амортизацію, $V_{\text{мон}}$ - об'єм моноліту, м^3 .

За базу для розрахунку економічного ефекту прийняті дані , отримані в умовах Катеринівського кар'єру ПП «Кванта-ЛЧ» (дані 2015 року) при розробленій технології видобування блоків лабрадориту.

Економічний ефект забезпечується підвищенням виходу блоків за рахунок зменшення бурових робіт, зменшення кількості використаного НРС та збільшення відстані між шпурами (за рахунок керованості зародкової тріщини).

Розрахунок очікуваного економічного ефекту при видобутку 1м^3 блоків лабрадоритів в умовах Катеринівського кар'єру ПП «Кванта-ЛЧ» мають практичну цінність для реалізації енерго - ресурсоощадливого видобування та попереднього оброблення блоків з лабрадориту в умовах з очікуваним економічним ефектом від впровадження розробленого пристрою 21350 грн. на 1000 м^2 площини розколу.

При використанні агрегатів з пластиною-вставкою було виключено з процесу видобутку блоків природного каменю шкідливий та небезпечний фактор «постріл НРС» (викиди НРС з шпура при кристалізації). Що підвищує безпеку видобувних робіт, та зменшує шкідливе навантаження на навколишнє середовище. В подальшому будуть продовжені роботи по вдосконаленню технологій використання НРС для гірничого виробництва.

Висновки до розділу

В результаті проведених промислових дослідів отримано такі дані:

– збільшення товщини пластини-вставки підвищує точність керування напрямом тріщиноутворення, але одночасно пластина-вставка з товщиною 8 мм значно зменшує об'єм НРС в шпурі (до 26 %), що негативно впливає на запас енергії суміші, а тому зменшує ширину тріщини відриву;

– пластина-вставка з мінімальною товщиною 5 мм зменшує точність керування напрямом тріщиноутворення, але в той же час збільшує об'єм НРС в шпурі на 16 %, що позитивно впливає на збільшення ширини тріщини відриву;

– застосування агрегату з пластиною-вставкою надає можливість керувати процесом розколу блоків в заданому напрямку, що особливо важливо при виконанні робіт в анізотропному масиві;

– використання пристрою з торцевими обмежувачами дає можливість скоротити час розколу блоків за рахунок ізоляції об'єму НРС в шпурі;

– при використанні розробленої технології значно зменшується кількість необхідної НРС;

– площини поверхонь відколу блоків відповідають вимогам відносно якості даної продукції;

– встановлено, що результати дисертаційних досліджень мають практичну цінність для реалізації енерго - ресурсоощадливого видобування та попереднього оброблення блоків з лабрадориту в умовах Катеринівського кар'єру ПП «Кванта-

ЛЧ» з очікуваним економічним ефектом від впровадження розробленого пристрою 21350 грн. на 1000 м² площини розколу.

Отримані результати надали можливість збільшити відстані між шпурами з пластинами-вставками (на 25 % відносно конкретних перерахованих вище початкових умов). У разі зміни властивостей породи, товщини пластин-вставок питання збільшення відстані між шпурами остаточно може бути вирішене тільки після проведення натурних експериментів. Збільшення відстані між шпурами дає можливість зменшення до 25 % працемістких бурових робіт. Також при використанні розробленого агрегату виключено з процесу видобутку кам'яних блоків шкідливе та небезпечне явище «пострілу НРС» (стрімке викидання НРС з шпура при кристалізації).

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково – дослідною роботою, в якій на основі комплексу теоретичних та експериментальних досліджень закономірностей формування поля напружень та розвитку деформаційних процесів в скельному масиві, руйнованому в статичному режимі зарядом НРС, вирішено актуальну науково – технічну задачу вдосконалення технології керованого відколювання кам'яних блоків від скельного масиву різного рівня анізотропії невибуховими руйнуючими сумішами шляхом застосування шпурового агрегату з пластиною-вставкою, що керує напрямком розвитку площини відриву та забезпечує підвищення продуктивності і техніко-економічних показників методу.

Основні наукові та практичні результати проведених досліджень полягають в наступному:

1 Вперше теоретично досліджено розподіл напружень навколо шпура з НРС і пластиною - вставкою, що дало змогу визначити технологічні параметри керованого розколу скельних порід з допомогою керуючих пластин – вставок з раціональної товщини в межах $5 \text{ мм} \leq h \leq 8 \text{ мм}$.

2. Числовим аналізом на основі застосування третьої умови міцності встановлено, що завдяки присутності пластини-вставки в шпурі на її торцях створюються концентратори розтягуючих напружень, які в ізотропному скельному масиві визначають напрямок розколу породи в площині шпурів вздовж пластин-вставок.

3. Теоретично доведено, що величина довільного відхилення тріщини відриву на кут « α » від площини шпурів в породному масиві пов'язана залежностями логарифмічного типу з показником анізотропії породи, з товщиною пластини-вставки в шпурі та кутом орієнтації пластини « β » відносно більшої осі анізотропії;

4. Пластини з більшою товщиною (до 8 мм), забезпечують більшу вірогідність тріщиноутворення в заданому пластиною напрямку, але при подальшому зростанні цього параметра в шпурі діаметром 40мм суттєво зменшується тиск від

розширюваної НРС (до 10 %) що негативно впливає на ширину отриманої тріщини відколу.

5. Аналітично доведено, що для розколу анізотропної породи під кутом α до осі анізотропії U в шпурі з пластиною – вставкою необхідно створити тиск, більший на $10 \div 15$ % від $[\sigma_p]$ породи.

6. Розроблено уточнену аналітичну формулу для визначення відстані між шпурами з НРС у разі застосування пластин – вставок, яка обґрунтовує можливість збільшення відстані між шпурами на величину до 25 %.

7. Експериментальні дослідження на моделях з цільнотягнутих циліндричних сталевих труб діаметром $D = 40$ мм з використанням пластин – вставок дозволили якісно довести правильність розробленої теоретичної методики керування напрямом тріщиноутворення з допомогою пластин-вставок.

8. Одержано експериментальну залежність «якості» геометрії тріщини розколу від товщини пластини-вставки у вигляді усередненого відхилення кінців тріщини відколювання від площини шпурів, яка зменшується з 10,6 % при $h = 5$ мм до 8,4 % при $h = 8$ мм;

9. Доведено, що запропоновані результати дисертаційних досліджень мають практичну цінність для видобування та попереднього оброблення блоків з лабрадориту в умовах Катеринівського кар'єру ПП «Кванта-ЛЧ» з очікуваним економічним ефектом від впровадження розробленого пристрою 21350 грн. на 1000м^2 площини розколу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Ощадливі способи відділення кам'яних блоків [Електронний ресурс]: монографія / Кравець В. Г., Ткачук К. К., Гребенюк Т. В., Ган А. Л. ; НТУУ «КПІ». – Київ, 2016. – 216 с.
2. Бакка М.Т. Видобування природного каменю: [навч. посібник для студентів вищ. навч. закл.] / Бакка М.Т., Кузьменко О.Х, Сачков Л.С. – К.: КПІ, ІСДО, 1993. – 352 с.
3. Карасёв Ю.Г. Природный камень. Добыча блочного и стенового камня: [учеб. пособие для студентов высш. учеб. зав.] / Карасёв Ю.Г, Бакка Н.Т. – Санкт-Петербургский горный ин-т. СПб, 1997. – 428 с.
4. Карасёв Ю.Г. Технология горных работ на карьерах облицовочного камня / Карасёв Ю.Г. – М. Недра, 1995. – 296 с.
5. Добыча и обработка природного камня: Справочник под общей редакцией А.Г. Смирнова: М.: «Недра», 1990. – 445 с.
6. Кравец В.Г. Динамика формирования монотрешины взрывом в горном массиве / В.Г. Кравец, П.З. Луговой, А.Л. Ган, З. Барановский // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво». – 2006. – Вип. 13. – С. 18 – 23.
7. Кравець В.Г. Розвиток комбінованого методу відділення монолітів від масиву гірських порід / В.Г. Кравець, К.К. Ткачук, А.Л. Ган, Т.В. Гребенюк // Вісник НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво». – 2010. – Вип. 19. – С. 69 – 78.
8. Кравец В. Г. Принципы формирования диаграммы направленности детонационного фронта в промышленном заряде / В. Г. Кравец, А. Л. Ган // XIV Międzynarodowe Sympozjum «Geotechnika – Geotechnics 2010», Gliwice – Ustka 19 – 22 października 2010, S. 93 – 113.
9. Кравец В.Г. Экспериментальное моделирование суперпозиции взрывных волн при действии смежных зарядов / В.Г. Кравец, П.З. Луговой, А.Л. Ган // Физика и техника высокоэнергетической обработки материалов. Сборник научных трудов. – 2007. Днепропетровск. – С. 274 – 281.

10. Бойко В.В. Пути повышения эффективности и безопасности взрывных работ на карьерах. / В.В. Бойко, Н.В. Кривцов, Н.Ф. Гончар. – Киев: «Знание», 1982. – 20 с.
11. Бойко В.В. Оценка сейсмостойкости сооружений на основе определения динамических напряжений в массиве с объектами различной формы / В.В. Бойко, В.И. Колодий, Н.В. Кривцов // Горные породы при динамических нагрузках. – Киев: Наук, думка. – 1989. – С. 59 – 63.
12. Бойко В.В. Прогнозирование сейсмoeffекта промышленных взрывов в условиях блочного строения гранитов Украины / В.В. Бойко // Теория и практика совершенствования взрывных работ. – Киев: Наук, думка. – 1990. – С. 107 – 110.
13. Вовк А.А. Основы прикладной геодинамики взрыва / А.А. Вовк. – Киев: Наук. думка, 1976. – 274 с.
14. Вовк А.А. Поведение грунтов под действием импульсных нагрузок / А.А. Вовк, Б.В. Замышляев, Л.С. Евтерев. – Киев: Наук, думка, 1984. – 288 с.
15. Воробьёв В.Д. Влияние параметров трещиноватости горного массива на характер распределения энергии взрыва цилиндрического заряда ВВ / В.Д. Воробьёв, В.С.Прокопенко//Изв. вузов. Горн, журнал. – 1977. – С. 33-37.
16. Воробьёв В.Д. Взрывные работы в скальных породах / В.Д. Воробьёв, В.В. Перегудов. – Киев: Наук, думка, 1984. – 240 с.
17. Покровский Г.И. Взрыв / Г.И. Покровский. – М.: Недра, 1973. – 183 с.
18. Ефремов Э.И. Механика взрывного разрушения пород различной структуры / Э.И. Ефремов, В.Д. Петренко, Н.П. Рева, И.Л. Краковский. – Киев: Наук. думка, 1984. – 192 с.
19. Ефремов Э.И. Ресурсосберегающие технологии взрывного разрушения горных пород / Э.И. Ефремов, В.М. Комир, И.А. Краснопольский, В.П. Мартыненко. – К.: Техника, 1990. – 149 с.
20. Воробьев В.В. Экспериментальное обоснование параметров

низкотемпературного метода разрушения горных пород / В.В. Воробьев, В.А. Хорошман // Вісник НТУУ “Київський політехнічний інститут”. Серія “Гірництво”. Зб. наук. праць. – Київ: НТУУ “КПІ”: 2012. – Вип. 22. – С. 97 – 101.

21. Воробьев В.В. О влиянии конструкции заряда на характер развития начальной стадии разрушения твердых тел / В.В. Воробьев, М.В. Помазан // Вісник Кременчуцького національного університету ім. М.Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2014. – Вип. 1/2014 (84). – С. 151 – 156.

22. Мосинец В.Н. Деформация горных пород взрывом / В.Н. Мосинец. – Фрунзе: «Илим», 1971. – 188 с.

23. Мосинец В.Н. Дробящее и сейсмическое действие взрыва в горных породах / В.Н. Мосинец. – М.: Недра, 1976. – 271 с.

24. Мосинец В.Н. Разрушение трещиноватых и нарушенных горных пород / В.Н. Мосинец, А.В. Абрамов. – М.: Недра, 1982. – 218 с.

25. Ткачук К.Н. Разрушение горных пород взрывом / К.Н. Ткачук. – Киев: Техніка, 1976. – 203 с.

26. Ткачук К.Н. Взрывные работы в горнорудной промышленности / К.Н. Ткачук, П.И. Федоренко. – Киев: Вища школа, 1978. – 270 с.

27. Кальчук С.В. Обґрунтування параметрів пасерування блоків каменю в кар'єрі квазістатичними методами відколу / С.В. Кальчук, В.О. Шлапак // Вісник НУВГП: Зб. наук. праць. – Рівне, 2014. – Випуск 2 (66). – С. 127 – 133.

28. Соболевський Р.В. Управління якістю бурових робіт для підвищення ефективності алмазно - канатного різання / Р.В. Соболевський, В.О. Шлапак, О.В. Камських // Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2015. – № 5. – С. 106 – 111.

29. Луговий П.З. Експериментальний аналіз взаємодії статичних і динамічних деформацій в зоні циліндричного шпура для відбійки кам'яних блоків / П.З. Луговий, К.К. Ткачук, Т.В. Гребенюк // Актуальні проблеми інженерної

механіки. матеріали II Міжн. Наук. – техн. конференція. – Миколаїв (22 – 24 жовтня 2012 р.), Національний університет кораблебудування. – С. 13 – 14.

30. Луговий П.З. Про застосування статико-динамічного методу при видобуванні гранітних блоків / П.З.Луговий, Н.Я. Прокопенко, К.К. Ткачук, Т.В. Гребенюк // матеріали IX Міжн. Наук. – техн. конференції «Розробка, використання та екологічна безпека сучасних гранульованих та емульсійних вибухових речовин» (Кременчук-Свалява 2013 р.) – С. 34 – 35.

31. Ткачук К.К. Аналіз впливу якості бурових робіт на видобуток блочного каменю / К.К.Ткачук, Т.В. Гребенюк // матеріали VI Міжн. Наук. – практичної конференції молодих вчених, аспірантів та студентів “Перспективи освоєння підземного простору”, Дніпропетровськ 2012 – С. 18 – 23.

32. Ткачук К.К. Потенційні можливості агрегатів з пружними елементами для створення статичних навантажень всередині шпурів, виконаних в гранітних блоках / К.К. Ткачук, Т.В. Гребенюк та інш. // Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатації машинобудівних конструкцій. Тези доповідей. 7-9 листопада 2012 р., м. Львів. – С 104.

33. Ткачук К.К. Разработка методов, повышающих эффективность добычи гранитных блоков: дис. кандидата технических наук: 26.10.90 / Ткачук Константин Константинович. – К., 1990. – 222с.

34. Бакка М.Т. Основні положення механіки в гірництві : [посібник для студентів вищ. навч. закл.] / М.Т. Бакка, І.С. Редчиць, В.С. Редчиць – Житомир: ЖІТІ, 2000. – 138 с.

35. Бакка М.Т. Основи гірничого виробництва: [навч. посібник для студентів вищ. навч. закл.] / Бакка М.Т., Лягутко А.С., Пчолкін Г.Д. – Житомир : ЖІТІ, 1999. – 430 с.

36. Бакка Н.Т. Инструмент и материалы для добычи и обработки природного камня: [учеб. пособие для студентов высш. учеб. зав.] / Бакка Н.Т., Мельничук П.П. – Житомир: ЖІТІ, 2002. – 436 с.

37. Гребенюк Т.В. Обґрунтування технологічних параметрів статико - динамічного методу видобування кам'яних блоків: дис... канд. тех. наук: 05.15.03 / Т.В. Гребенюк – К., 2013. – 142 с.
38. Блюменфельд В.М. Рациональный способ добычи гранитных блоков // Горный журнал. – 1996. №6. – С. 33 - 35.
39. Генератор тиску хімічний «Літокол» проти НРС та пороху. Камінь. Вісник каменярства. – К.: 2005. – №9 – С.29 – 31.
40. Пат. 2026987 Российская Федерация, МПК6 E 21 C 37/00. Способ ведения буровзрывных работ / В.Г. Лабейш, О.Н. Кирсанов; заявитель и патентообладатель В.Г. Лабейш, О.Н. Кирсанов. – № 5039335/03; заявл. 24.03.1992; опубл. 20.01.1995, Бюл. № 27. – 3 с.
41. Б.Я. Светлов Теория и свойства промышленных взрывчатых веществ / Б.Я. Светлов, Н.Е. Яременко. – М.: Недра, 1966. – 232 с.
42. Звягинцев Л.И. Совершенствование технологии выемки блоков известняков на карбонатных месторождениях / Л.И. Звягинцев, В.И. Супрун, А.П. Бульбашев // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: МГГУ, 2001. – №2. – С. 126-130.
43. Шлапак В.О. Оптимізація технологічних параметрів процесу розпилювання високоміцного декоративного каменю алмазно-канатопильними верстатами // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. – Житомир:ЖДТУ, 2011. - №2.- Ч. 177 – 183.
44. Новые методы разрушения горных пород: учеб. пособие для вузов / М.А. Емелин [и др.] – М.: Недра, 1990. – 290 с.
45. Латышев Л.И. Инженерное решение как критерий отбора / Л.И. Латышев // Изобретатель и рационализатор. – 1996. – №6. – С. 28-30.
46. Лебедев Ю.А. Безвзрывной раскол скального массива / Ю.А. Лебедев, А.К. Горьков, А.Б. Макаров, В.Г. Колодин // Горный журнал. – 1996. №6. – С. 35-39.

47. Алимов О.Д. Экспериментальные исследования безвзрывного раскола природного камня с адаптивными рабочими органами / О.Д. Алимов, М.Т. Мамасаидов, А.Я. Хохлов // Физико-технические проблемы полезных ископаемых. – 1990. – №3. – С. 52-57.

48. Клишин В.И. Способы и технические средства невзрывного разрушения горных пород растягивающими усилиями / В.И. Клишин, Ю.М. Леконцев, А.В. Новик // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: МГТУ, 2000. – №10. – С. 70-72.

49. Латышев, О.Г. Прогнозирование эффективного использования поверхностно-активных веществ в процессе механического разрушения горных пород / О.Г. Латышев, В.П. Рыбак // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: МГТУ, 2000. – №4. – С. 234-236.

50. Разрушение горного массива взрывоимпульсным действием / отв. ред. А.В.Докунин. АН СССР, ИГД им. А.А. Скочинского, Мин-во угольной промышленности СССР. – М.: Недра, 1974. – 228 с.

51. Муравин, Б.Г. Гидравлические методы дробления горных пород / Б.Г.Муравин, А.В. Бурштейн, Я.В. Симкин // Механизация строительства. – 1982. – №7. – С. 55-58.

52. Пат. 2182969 Российская Федерация, МПК6 Е 21 С 37/00. Способ беспламенного разрушения твердых тел и устройство для его осуществления / Б.А. Адамович, А.Г. Дебичев, В.И. Дудов [и др.]; заявитель ЗАО Промышленноинвестиционная компания «Ресурспромвест». – № 2000122639/03; заявл. 31.08.2000; опубл. 27.05.2002, Бюл. № 9. – 3 с.

53. Булавкин А.А. Технологические комплексы на базе гидроагрегата УСВД-3500 для контурной резки камня / А.А. Булавкин, И.М. Семешин, М.Г. Шеметов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: МГТУ, 2000. – №3. – С. 105.

54. Шустов, Н.В. Взрывогидравлический способ разрушения твердых пород / Н.В. Шустов. – М.: Недра. 1968. – 48 с.

55. Автоматизированная экспериментальная установка для термической резки горных пород в массиве и результаты ее производственных испытаний / И.П. Голдаев, Н.Н. Попов, В.В. Спесивцев [и др.] // Термические методы разрушения горных пород : Труды II Всесоюзной науч.-техн. конф. Днепропетровск. Ч. IV. – Киев: Наукова думка, 1972. – С. 100-103.

56. Осадчих В.Н. Результаты опытно-промышленной резки скальных массивов в условиях строительства ДНЕПРОГЭС-2 / В.Н. Осадчих, В.П. Черепанов, К.А. Захваткин // Термические методы разрушения горных пород : Труды II Всесоюзной науч.-техн. конф. Днепропетровск. – Ч. IV. – Киев: Наукова думка, 1972. – С. 76-77.

57. Менжулин С.Е. Наведенная трещиноватость, разупрочнение и разрушение горных пород при СВЧ нагреве / С.Е. Менжулин, Н.В. Соколова, А.И. Шишов // Горный информационно-аналитический бюллетень. – М.: МГТУ, 2001. – №2 – С. 126-130.

58. Назаров П.Ч. Технология направленного раскола крупных отдельностей и дробления негабаритов электроразрядным методом на карьерах природного камня / П.Ч. Назаров, Г.Л. Левковский // Горный информационноаналитический бюллетень. – М.: МГТУ, – 2000. – №9 – С. 129.

59. Ткачук К.К., Гребенюк Т.В., Луговой П.З. Про створення дифракційних режимів навантаження для відбійки кам'яних блоків // Вісник НТУУ “КПІ” Серія “Гірництво”– 2012. – Вип. 22. – С. 52 - 59.

60. Терентьев О.М., Стрельцова М.И., Закієв М.І. Ослаблення масиву гірських порід магніто-гідрокавітаційним навантаженням // Збірник «Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва». – Науково-виробничий збірник: Кременчуцький університет імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2013. – Вип. 1/2015(15). – С. 18–24.

61. Терентьев О.М., Стрельцова М.И. Энергоемность та питома поверхнева енергія руйнування гірських порід магніто-гідрокавітаційним навантаженням // Вісник НТУУ “КПІ” Серія “Гірництво” – 2015. – Вип. 28. – С. 29 - 35.
62. Волженский А.В. Влияние размера кристаллов окиси кальция и температурных условий на скорость гидратации извести / А.В. Волженский, В.Н. Виноградов // Изв. вузов «Строительство и архитектура». – 1965. – С. 67 – 71.
63. Заявка 60-32879 Япония, МКИ С 09 К 3/00, В 02 С 19/18. Разрушающая добавка для хрупких материалов, включающая доменный шлак / Кавамура Хироки. – № 58 - 139359; заявл. 01.08.83; опубл. 20.02.85.
64. Заявка 58-142957 Япония, МКИ С 09 К 3/00, В 02 С 19/18. Композиция для разрушения хрупкого материала / Иногути Юкиот; заявитель Мицуи ходзай к.к. – № 57-24460; заявл. 19.02.82; опубл. 25.08.83.
65. Заявка 60-32878 Япония, МКИ С 09 К 3/00, В 02 С 19/18. Разрушающая добавка для крупного материала / Киба Кейтира, Мияка Тойдзиро, Уэдзи Ясуси, Накада Хирохико; заявитель Мицуи ходзай к.к. – № 58-139758; заявл. 01.08.83; опубл. 20.02.85.
66. Заявка 60-26080 Япония, МКИ С 09 К 3/00, В 02 С 19/10. Композиция для разрушения материалов / Фудзиока Исами, Кибаси Такаюки, Киада Кадзутоси; заявитель Сэнтотару гарасу к.к. – № 58-132822; заявл. 22.03.83; опубл. 08.02.85.
67. Заявка 60-110778, Япония, МКИ с 09 к 1/00, в 02 с 19/10. Состав для разрушения скальных пород / Фудэкака Исами, Исибаси Такаюки, Имада Кадаутоси, Нисимура Нотоясу; заявитель Сэнтотару гарасу к.к. – № 58-217898; заявл. 21.11.83; опубл. 17.06.85.
68. Пат. 4565579 США, МКИ С 04 В 2/0 НКИ 106/1182. Nonexplosive chemical composition for gently breaking rock or concrete base. / Fujiok Isani, Imada Kazutushi, Kishmura Motoyasu; заявитель Ishibashi Jakayuhli Cenral Glass Co., Ltd. – № US 06/545,695; заявл. 26.10.83; опубл. 21.01.86.
69. Заявка 59-78286 Япония, МКИ С 09 К 3/00. Химическая разрушающая

композиция / Будзиока Исами, Имада Кадзутоси, Нисимура Мотолсу; заявитель Сэнторау гарасу к.к. – № 57-188238; заявл. 28.10.82; опубл. 07.05.84.

70. Средства статического разрушения/ Юкинори Ямадзаки // Сэкко то сэккай, Gyps and Lime. – 1987. – № 208. – С. 175-183.

71. Пат. 246982 ГДР, МКИ С 04 В 7/34. Способ разрушения хрупких материалов / Н.О. Eckler, W. Bergholt, M. Peneyal, D. Korth; заявитель Vanakademie der DDR. – № 2854807; заявл. 27.12.85; опубл. 24.06.87.

72. Пат. CS241200 ЧС, МПК C04B20/02, F42D99/00. Method of suspension preparation from mixture for solid systems disengagement / J. Siska, J. Supala, R. Fedorik, M. Miazdra, M. Pavlik, J. Sloboda, J. Sevcikova, H. Martauzova; заявитель J. Siska – № CS19830009330; заявл. 12.12.1983; опубл. 13.03.86.

73. Пат. CS248903 ЧС, МПК B02C19/18; C01F11/02. Inexplosive mixture for rigid systems disintegration with quick-acting effect / R. Fedorik, M. Miazdra, H. Martauzova, J. Siska, J. Sevcikova; заявитель R. Fedorik. - № CS19820006097; заявл. 20.08.1982; опубл. 12.03.87.

74. Rios Varguer Joine Практическое применение расширяющихся цементов для дробления и выемки пород / Joine Varguer Rios // Rocas y miner. – 1983. – 12 (№ 143). – P. 20-21, 24-26.

75. Сахно И.Г. Научные основы управления состоянием горных пород невзрывчатыми разрушающими смесями при подземной разработке месторождений: дисс... докт. техн. наук: 05.15.02 / Сахно Иван Георгиевич. – Красноармейск 2015 – 457 с.

76. Нижиченко А.Ф. Испытания НРС-1 при добыче гранита // М.: ВНИИЭСМ, -1985. – Вып. 2. -С. 8 – 10.

77. Невибухова руйнуюча речовина: ТУ У В.2.7-26.5-24478901-004:2007. [На заміну ТУ У БВ 2.7.00030937.089397]. Без обмеження терміну дії. – Харьков: Госстандарт. Харьк. центр стандартизації и аэрологии, 2007. – 14 с.

78. Ткачук К.К. Разрушение горных пород невзрывчатыми разрушающими

веществами / Ткачук К.К. // Разраб. рудн. местор., – К.: Республ. межвед. науч. техн. сб. – 1986. – Вып. 42. – С. 41– 44.

79. Ткачук К.К. Разработка эффективных и безопасных методов применения НРС для отделения блоков скальных пород от массива на карьерах / Ткачук К.К., Кичигин А.Ф., Козлов С.С. - № 01870047547, 1987. – С. 51-55.

80. Ткачук К.К. Развитие безвзрывного способа разрушения горны пород / К.К. Ткачук, И.А. Фоменко // Проблемы геотехнологии и инженерной экологии; научная конференция, 17 – 18 марта 1992г.: Тезисы докладов. – К.: 1992. – С. 96.

81. Ткачук К.К. Управление трещинообразованием при невзрывчатом разрушении пород / К.К. Ткачук // – Разработка рудных месторождений: Республ. межв. науч.-техн. сб. – 1994, Вып. 55. – С. 52-59.

82. Ткачук К.К. Повышение эффективности добычи гранитных блоков / К.К.Ткачук, И.А. Фоменко – К.: Строительные материалы и конструкции, 1991. -№2. – С. 28 – 29.

83. Ткачук К.К. Обоснование формы концентраторов напряжений при добыче гранитных блоков / К.К. Ткачук, И.О. Фоменко // Проблемы геотехнологии и инженерной экологии : Наукова конференція, 17-18 марта 1992 : тезисы докладов. – Киев : 1992. – с. 46-48.

84. Касьян Н.Н., Сахно И.Г., Шуляк Я.О., Особенности передачи давления, от стенок шпура, содержащего невзрывчатый разрушающий материал, вглубь породного массива / Збірник наукових праць НГУ №34, Том 1 – Дніпропетровськ: РВК НГУ, 2010. – 280 с., с. 136-143. Роздел 2.

85. Касьян Н.Н., Сахно И.Г., Шуляк Я.О., Обоснование методов управления скоростью роста распорно-компрессионных характеристик невзрывчатых разрушающих веществ / Вісті Донецького гірничого інституту. – 2010. №2., с. 209-220. Роздел 3.

86. Касьян Н.Н., Сахно И.Г., Шуляк Я.О., Способ приготовления

невзрывчатого разрушающего состава в шпуре / Материалы конференции «Перспективы освоения подземного пространства» - Днепропетровск. – 2011. с. 14-17. Роздел 3.

87. Касьян Н.Н., Сахно И.Г., Шуляк Я.О., Обоснование методов управления скоростью роста распорно-компрессионных характеристик невзрывчатых разрушающих веществ / Вісті Донецького гірничого інституту. – 2010. №2, Роздел 3.

88. Лабораторные исследования особенностей работы невзрывчатых разрушающих составов в условиях их предварительного сжатия / И.Г. Сахно // Проблеми гірського тиску. – Донецк, 2011. – №19. – С. 109-123.

89. Сахно И.Г. Влияние температуры и теплофизических свойств материалов на скорость их разрушения при помощи невзрывчатых разрушающих составов / И.Г. Сахно // Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва. – Науково-виробничий збірник: Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2011. – Вип. 2/2011 (8). С. 86-94.

90. Изучение причин самопроизвольного выброса невзрывчатых разрушающих веществ из шпуров / И.Г. Сахно, Н.Н. Касьян, А.О. Новиков [и др.] // Разработка рудных месторождений: Сб. научн. трудов. – Кривой Рог, 2011. – Вип. 94. – С. 75-78.

91. Пат. 100767 Україна, МПК(2013.01) E21C 37/00. Спосіб руйнування гірських порід / І.Г. Сахно, М.М. Касьян; заявитель и патентообладатель Донецкий Национальный Технический Университет. – а2011 03298; заявл. 21.03.2011; опубл. 25.01.2013, Бюл. № 2. – 3 с.: ил.

92. Сахно И.Г. Исследование механизма направленного разрушения горных пород невзрывчатыми разрушающими смесями / И.Г. Сахно // Науковий вісник національного гірничого університету. – 2013. – №6 (138). – С. 20-26.

93. Сахно И.Г. Направленное разрушение горных пород невзрывчатыми

разрушающими смесями / И.Г. Сахно, Н.Н. Касьян // Гірничий вісник: Науковотехнічний збірник / ДВНЗ «Криворізький національний університет». – Кривий Ріг, 2013. – Вип. 96. – С. 16 – 20.

94. Пат. 95732 Україна, МПК(2006.01) E21C 37/10. Патрон невибухового руйнуючого матеріалу / І.Г. Сахно, М.М. Касьян, І.І. Клочко; заявитель и патентообладатель І.Г. Сахно, М.М. Касьян, І.І. Клочко – а 2010 07567; заявл.17.06.2010; опубл. 25.08.2011, Бюл. №16. – 6 с.

95. Сахно И.Г. Лабораторные испытания патрона невзрывчатого разрушающего вещества / Я.О. Шуляк, А.А. Володьков // Проблеми гірничої технології. – 2010, с.39 – 44.

96. Сахно И.Г., Лабораторные исследования влияния водопорошкового отношения невзрывчатых разрушающих составов на скорость их гидратации / И.Г. Сахно, Я.О. Шуляк // Проблемы недропользования. Часть I. Санкт-Петербург. – 2011г., с. 169 – 170.

97. Патент 90941 на корисну модель, Україна МПК E21C 37/00. Шпурова вставка для направленного розколу монолітних об'єктів невибуховими розширюючими сумішами / І.О. Фоменко, О.І. Фоменко, А.І. Ковтун ; заявл. 06.02.2014; опублік. 10.06.2014, Бюл. №11.

98. Патент 92446 на корисну модель, Україна МПК E21C 27/14. Шпурова вставка для направленного розколу монолітних об'єктів невибуховими розширюючими сумішами / І.О. Фоменко, О.І. Фоменко, А.І. Ковтун ; заявл. 16.04.2014; опублік. 11.08.2014, Бюл. №15.

99. Патент 106912 на корисну модель, Україна МПК E21C 37/00. Шпурова вставка для направленного розкол монолітних об'єктів невибуховими розширюючими сумішами / А.І. Ковтун ; заявл. 19.11.2015; опублік. 10.05.2016, Бюл. №9.

100. Шуляк Я.О. Промышленные испытания способа направленного разрушения негабаритов при добыче гранита / Я.О. Шуляк, И.Г. Сахно Донбас-2020: перспективи розвитку очима молодих вчених: Матеріали VI науково-практичної

конференції, м. Донецьк, 24-26 квітня 2012 р. Секція 1. Роздел 4.

101. Шуляк Я.О. Исследования влияния рабочего объема шпура и его диаметра на скорость гидратации невзрывчатого разрушающего состава / Я.О Шуляк, И.Г. Сахно, А.А. Кириллова // Проблемы недропользования Международный форум-конкурс молодых ученых 25 – 27 апреля, Сборник научных трудов, часть 1, Санкт-Петербург – 2012. С. 142-144. Раздел 3

102. Шуляк Я.О., Сахно И.Г., Промышленные испытания способа направленного разрушения негабаритов при добыче гранита / Я.О Шуляк, И.Г.Сахно, // Донбас-2020: перспективи розвитку очима молодих вчених: Матеріали VI науково-практичної конференції, м. Донецьк, 24-26 квітня 2012 р. Секція 1. Роздел 4.

103. Шуляк Я.О. Оценка эффективности способа направленного разрушения монолитных блоков при помощи НРС / Проблемы гірничої технології: матеріали регіональної науково-практичної конференції, КІІ ДонНТУ, 30 листопада 2012р. – Донецьк: Цифрова типографія, 2012. – 392 с., с. 158-163.

104. Фоменко О.І. Підвищення ефективності технологічного процесу розколу гранітних блоків / О.І. Фоменко, К.К. Ткачук // Збірник наукових праць НТУУ «КПІ». Серія «Гірництво». К.: - 2009. - №18. – с.56 – 61.

105. Ковтун А.І. Підвищення безпеки використання невибухових руйнуючих сумішей (НРС) при видобутку штучного та декоративного каменю на кар'єрах / А.І. Ковтун // Проблеми охорони праці та цивільної: Збірник матеріалів 13-ї всеукраїнської науково-методичної конференції. 10-12 листопада 2015 р., Київ : НТУУ «КПІ», 2015.– С. 171–175

106. Фоменко І.О. Розробка та дослідження процесу керування напрямом розколу блочного каменю при використанні невибухових руйнуючих сумішей / І. О. Фоменко, О. І. Фоменко, І. М. Ковтун, А. І. Ковтун // Збірник «Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва». – Науково-виробничий збірник: Кременчуцький університет імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2013. – Вип. 2/2013(12). – С. 50–57.

107. Фоменко І.О. Аналіз технологічних особливостей керування напрямом тріщиноутворення в шпурах гранітних блоків при використанні невибухових руйнуючих сумішей / Фоменко І.О., Ковтун А.І. // Сталій розвиток промисловості та суспільства: (г. Кривий Ріг 2014): матеріали міжнародної науково-технічної конференції . ДВНЗ Криворізький національний університет.– С. 7–8.

108. Фоменко І.О. Розробка та дослідження силових можливостей безпечного та енергозберігаючого агрегату для розколу монолітних об'єктів / І.О. Фоменко, І.М. Ковтун, О.І. Фоменко, А.І. Ковтун // Збірник наукових праць. – Київ, ДУ «Національний науково-дослідний інститут промислової безпеки та охорони праці». – 2013. – Вип.26. – С. 44 – 48.

109. Справочник (кадастр) физических свойств горных пород / Под ред. Мельникова Н.В., Ржевского В.В., Протодяконова М.М. – М.: Недра, 1975. – 279с.

110. Петров Н.С. Основные требования к методике и математической обработке результатов экспериментальных исследований [конспект лекций] / Н.С. Петров. – М.: ВНИИ стройдормаш, 1971. – 64с.

111. Механика разрушения и прочность материалов : [справ. пособие в 4-х томах / наук. ред. Панасюк В.В.] – К.: Наукова думка, 1988.Т.2. Саврук М.П. Коэффициенты интенсивности напряжений в телах с трещинами / Саврук М.П. – 1988. – 620с.

112. Сопротивление материалов / Под ред. академика НАН Украины Писаренко Г.И. – 5-е изд., перераб. и доп. – К.: Вища школа, 1986. – 775с.

113. Дарков, А.В. Сопротивление материалов / А.В. Дарков, Г.С.Шпиро. – М.: Высшая школа, 1969. – 734 с. 253.

114. Пат. 59940 Украина, МПК 51 С 04 В 7/00. Невибухова руйнівна речовина НРР-80 / В.Ф. Грибко; С.В. Щєбликін, А.В. Палей; заявитель В.Ф. Грибко – № 2002129862 ; заявл. 09.12.02 ; опубл. 15.07.05 , Бюл. №7. – 6 с.

115. Бакка М.Т. Основи гірничого виробництва: [навч. посібник для

студентів вищ. навч. закл.] / Бакка М.Т., Лягутко А.С., Пчолкін Г.Д. – Житомир : ЖІТІ, 1999. – 430с

116. Кравець В.Г. Удосконалення технології для безпечного розколу гранітних блоків при використанні невибухових руйнуючих сумішей / В.Г. Кравець, Н.А. Праховнік, А.І. Ковтун // Збірник наукових праць. – Київ, ДУ «Національний науково-дослідний інститут промислової безпеки та охорони праці». – 2016. – Вип. 32. – С. 111 – 117.

117. Ржевский В.В., Новик Г.Я. Основы физики горных пород // М.-Недра. 1978. 390с.

118. Башта Т.М. Машиностроительная гидравлика / Т.М. Башта. – М.: Машиностроение, 1971. – 438с.

119. Дивай В.В. Влияние анизотропии физико-механических свойств массива на эффективность добычи гранитных блоков / Дивай В.В. – ВНИИЭСМ, серия 7, вып. 7, М.: 1988. – С.17.

120. Ткачук К.К. Распределение напряжений и радиус зоны разрушения пород при статической нагрузке в скважине / Ткачук К.К. – Разработка рудных месторождений. – Киев : Техника, 1988. - №46. – С.42-45

121. Першин Г.Д. Процесс разрушения массива при шпуровой добыче блочного камня / Г.Д. Першин, Е.Г. Пшеничная, Е.В. Северин. – Магнитогорск : МГТУ, 2004. – С. 92-102.

122. Протасов Ю.И. Разрушение горных пород / Протасов Ю.И. – М.: Недра, 1995. – С.453.

123. Фоменко О.І. Вплив особливостей навантаження свердловин на формування напруженого стану скельного масиву при видобутку блочного каменю / О.І. Фоменко // Математичні проблеми технічної механіки : міжнародна наукова конференція 21-24 квітня 2008р. : тези доповідей. – Дніпропетровськ-Дніпродзержинськ : 2008. – С.171.

124. Руководство по применению невзрывчатых разрушающих средств для

разборки строительных конструкций и каменных горных пород. – Киев: ВНИИСтром им. П. П. Будникова Минстройматериалов СССР, 1988 – 48 с.

125. Экспериментальная техника для исследования предельных состояний горных пород / А.Д. Алексеев, Г.П. Стариков, Т.П. Асеева [и др.] // Физика и техника высоких давлений. – 1993. – Т.3. – №3. – С. 135-145.

126. Луговий П.З. Відокремлення монолітів з допомогою шпурів, які мають профільні надрізи в площині передбачуваного відколу / П.З. Луговий, О.І. Фоменко // Деформація та руйнування матеріалів з дефектами та динамічні явища в гірських породах та виробках : XVII міжнародна наукова школа ім. акад. С.А. Христиановича, 22-28 вересня 2008р: тези доповідей – Алушта : 2008.

127. Косолапов А.И. Определение параметров технологии добычи блоков мрамора невзрывчатыми разрушающими средствами / А.И. Косолапов, Н.И. Вольченко. – М.: Строительные материалы №1, 1990 – С. 12-14.

128. Ткачук К.К. О ширине раскрытия трещины при разрушении горных пород статическими нагрузками / Ткачук К.К. – Разработка рудных месторождений : Респ. Межв. науч. тех. сб. – Киев : 1991. – Вып. 56. – с. 59 – 62.

129. Ткачук К.К. Потенційні можливості агрегатів з пружними елементами для створення статичних навантажень всередині шпурів, виконаних у гранітних блоках / К.К. Ткачук, Т.В. Гребенюк, Ю. Гаптар, О.І. Фоменко, І.О. Фоменко // Теорія та практика раціонального проектування, виготовлення і експлуатувці машинобудівних конструкцій. Тези доповідей. 7 – 9 листопада 2012 р. м. Львів. – С 104.

130. Кравець В.Г. Теоретичне визначення технологічних параметрів керованого розколу гірської породи невибуховими руйнуючими сумішами / В.Г. Кравець, С.М. Стовпник, А.І. Ковтун, П.З. Луговий // Вісник КрНУ імені Михайла Остроградського. КрНУ, 2017. – Вип. 2/2017(20). – С. 15 – 25.

131. Стовпник С.М. Формування тріщини відриву при видобутку блокового

каменю / С.М. Стовпник, А.І. Ковтун, Н.Ф. Качинська, О.С. Прит // Вісник ЖДТУ. Технічні науки. – Житомир: ЖДТУ, 2017. – № 2/(80). – С. 200 – 206

132. Писаренко, Г.С. Сопротивление материалов деформированию и разрушению при сложном напряженном состоянии / Г.С. Писаренко, А.А. Лебедев. – К.: Наукова думка, 1969. – 210 с

133. Ковтун А.І. Підвищення екологічної безпеки на кар'єрах Житомирської області / А.І. Ковтун // Ресурсозбереження і екологічна безпека технологічних процесів промислового і цивільного будівництва : Тези доповідей VII Міжнародної науково – технічної конференції «Енергетика. Екологія. Людина», 15 – 17 травня 2015 р., Київ : НТУУ «КПІ», 2015. – С. 37 – 39.

134. Фоменко І.О. Керування напрямом тріщиноутворення по осях ортотропії гранітів при використанні невибухових руйнуючих сумішей та агрегатів з пластинами-вставками / І. О. Фоменко, О. І. Фоменко, І. М. Ковтун, А. І. Ковтун // Збірник «Сучасні ресурсоенергозберігаючі технології гірничого виробництва». – Науково-виробничий збірник: Кременчуцький університет імені Михайла Остроградського. – Кременчук: КрНУ, 2015. – Вип. 2(16). – С. 41–48.

135. Фоменко І.О. Дослідження технологічних параметрів процесу керування напрямком розколу блочного каменю під час використання невибухових руйнуючих сумішей / І. О. Фоменко, А. І. Ковтун // Вісник Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут» Серія «Гірництво» – К. – 2014. – Вип. 26 – С. 63–69

Додаток А

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор Катеринівського кар'єра
ПП «Кванта-ЛЧ»

М.В.Ренкас

2015 р.

Акт

про результати виконаних експериментів на Катеринівському
кар'єрі блочного каменю

Даний акт складений про те, що представниками Національного технічного університету України «КПІ» (НТУУ «КПІ») проф. Вороб'єв В. Д., доц.Ковтуном І.М. та здобувачем Ковтуном А.І. разом з директором Катеринівського кар'єру ПП «Кванта» Ренкаса М.В. були проведені дослідження по розколу блоків лабрадориту з застосуванням спеціального пристрою з металевою вставкою для направлено розколу монолітних блоків за допомогою невибуховими розширюючими сумішами (НРС).

Метою дослідів було визначення можливості направлено розколу блоків лабрадориту, розробленим пристроєм для направлено розколу за допомогою НРС. Напряга розколу характеристика лабрадориту $\sigma = 40$ МПа.

При проведенні експериментів використовувались блоки лабрадориту з наступними геометричними розмірами : висота 0,9 -1,1 м; ширина 1,3 -1,6 м; довжина 2,5 -2,7 м. В блоках були пробурені ряди шпурів діаметром 40мм з кроком 20...25см.

Для направлено розколу блоку лабрадориту були застосовані розроблені в НТУУ «КПІ» пристроїв для направлено розколу за допомогою невибухових розширюючих сумішей (патент України на корисну модель №90941 від 10.06.2014). Активна довжина вставки складала 60см. Було проведено розкол 4 блоків, в кожному відстань між шпурами 0,2 м (2 блока) та 0,25 м (2 блока).

В результаті проведених дослідів були зроблені наступні висновки:

- розроблені пристрої довели свою працездатність в умовах кар'єру;
 - в порівнянні з існуючими технологіями розколу блочного каменю за допомогою невибухових розширюючих сумішей розроблений пристрій показав себе більш ефективним порівняно з відомими технологіями має наступні експлуатаційні та технологічні переваги:

* конструктивні особливості пристрою унеможливають викиди (постріли) невибухових розширюючих сумішей зі шпурів, що значно зменшує небезпеки при використанні НРС;

* пристрій дає можливість для розколу блоків використовувати не тільки енергію роста кристалів НРС, а також енергію пари яка виникає підчас реакції НРС з водою;

* можливість керувати процесом розколу блоків в заданому напрямку

* простота конструкції дає можливість виготовлення пристрою в майстерні кар'єру;

* використання пристрою дає можливість скоротити час розколу блоків за рахунок закритого об'єму шпура ;

* при використанні даної технології значно зменшується кількість необхідного НРС;

* площини поверхонь відколу блоків відповідають вимогам якості, для даної продукції.

Кар'єр зацікавлений у співробітництві з НТУУ «КПІ» по удосконаленню та впровадженню технології розроблених шпурових вставок для видобутку блоків за допомогою НРС.

Від НТУУ «КПІ»

Воробьев В.Д.

к. т. н., доцент Ковтун І. М.

Здобувач Ковтун А. І.

Від Катеринівського кар'єру ПП Кванта-ЛЧ директор

М.В.Ренкас
 Головний мех. Гінер Я. М.

Додаток Б

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Директор Катеринівського кар'єра

ПП «Кванта-ЛЧ»

М.В.Ренкас



« »

2015 р.

Акт

про впровадження результатів дисертаційних досліджень Ковтуна Андрія Івановича на Катеринівському кар'єрі блочного каміння

Комісія у складі: від кар'єру - директор Ренкас М.В., головний механік Гінер Я. М.; від НТУУ «КПІ» - д. т. н., проф. Вороб'єв В.Д., к. т. н., доц. Ковтун І. М.; Здобувач Ковтун А. І. склали цей акт у наступному:

1. Кар'єр Катеринівський ПП «Кванта-ЛЧ» засвідчує, що ним були прийняти до впровадження результати дисертаційних досліджень Ковтуна А.І., зокрема застосування в шпурах розробленого пристрою для направлено розколу за допомогою невибухових розширюючих сумішей (патент України на корисну модель №90941 від 10.06.2014).
2. Натурні експерименти та випробування пристрою мали мету визначення основних технологічних параметрів. Впровадження відбувалось в технологічний процес кар'єру, вивчались техніко – економічні показники методу, зменшення екологічного навантаження на навколишнє середовище в порівнянні з існуючими технологіями, досліджувалась якість площини розколу блоків.

3. Комісія встановила, що запропоновані результати дисертаційних досліджень Ковтуна А.І. мають практичну цінність для реалізації енерго - ресурсоощадливого видобування та попереднього оброблення кам'яних блоків в умовах Катеринівський кар'єр ПП «Кванта-ЛЧ» з очікуваним економічним ефектом від впровадження розробленого пристрою 21350 грн. на 1000м² площини розколу блоків.

Від НТУУ «КПІ»

Вороб'єв В.Д.

Ковтун І. М.

Ковтун А.І.

Від Катеринівського
кар'єру ПП Кванта-ЛЧ

директор

Ренкас М.В.

Головний мех. Гінер Я. М.