

Якостни и деформационни характеристики на скалите по проектното трасе на наклонена шахта за рудник "Челопеч"

Венцислав Иванов

Минно-геоложки университет "Св. Иван Рилски", 1700 София

РЕЗЮМЕ. За геомеханично осигуряване разработването на проект, за строителство на наклонена шахта, на рудник "Челопеч" са извършени лабораторни изследвания на механичните свойства на скалите, по трасето на бъдещата шахта. Изпитани са 106 образци, получени от седем проучвателни сондажи – пет от повърхността и два подземни, които пресичат шест литоложки разновидности скали, изграждащи масива, в района на проектираната шахта.

STRENGTH AND STRAIN PROPERTIES OF THE ROCKS SURROUNDING THE DESIGN ROUTE OF AN INCLINED SHAFT AT CHELOPECH DEPOSIT

ABSTRACT. Laboratory tests of mechanical properties of rocks, surrounding the route of a future shaft were performed to provide a geomechanical background for the design of an inclined shaft at the "Chelopech" mine. Hundred and six (106) samples were subjected to testing. Samples were delivered from the core of seven boreholes – five drilled from the surface and two holes - from the underground, which crossed six lithological types of rocks of the area of the designed shaft.

Увод

Проектът на "ЧЕЛОПЕЧ-МАЙНИНГ" АД, за развитие на рудника, предвижда оптимизиране на транспортната схема, чрез строителство на наклонена шахта.

За нуждите на проекта, по сключен договор, в лабораторията по "Механика на скалите" на МГУ "Св. Иван Рилски" са доставени за изследване проби на тела от ядрови сондажи – пет наземни и два подземни, прокарани в района на трасето на бъдещата шахта. Проучвателните сондажи от повърхността се характеризират с нисък коефициент на изважданата ядка¹, пресичат основно слаби скали – разновидности глинни, изветрели вулканити и силно променени андезити, които съдържат съществени глинести прослойки и тектонски раздробени зони. От доставените общо 107 пробни тела са изработени 106 годни за изпитване образци: 75 броя от прокараните от повърхността и 31 от подземните сондажи. Тези обстоятелства по същество определят възможните обеми и видове лабораторни изпитвания.

Изследванията на якостните свойства на скалите на едноосов натиск и опън, са извършени по схема NN – недренирани и неконсолидирани на стационарна преса EDZ-100, с автоматично подаване на товара, с градиент 0,5 MPa/min за едноосов натиск и 0,2 kN/sec при определяне якостта на опън. Всички изследвания са в съответствие с препоръките на ISRM [2].

При изследванията са определени следните физико-механични свойства и характеристики:

- обемна плътност, γ [MN/m³];
- съдържание на вода, W [%];
- якост на едноосов натиск, σ_c [MPa];
- якост на опън, σ_t [MPa];
- якост на срязване, τ [MPa];

- модул на еластичност, E [GPa]
- коефициент на Поасон, ν
- кохезия C [MPa] и ъгъл на вътрешно триене φ [...] при върхова якост и обемно напрегнато състояние (онс);
- извършена е статистическа оценка по надеждност и представителност на получените резултати, където е възможно, като са оценявани надеждността на определяне P и изменчивостта на параметрите чрез коефициента на вариация
- построени са обобщени паспорти за якост в условията на обемно напрегнато състояние, по литоложки разновидности;
- построени са пълните деформационни криви σ - ϵ и е изследвана деформируемостта на разновидностите брекча от подземните сондажи.

I. Резултати от изследването

Пълният обем изследвания, обработка и анализ на получените резултати са представени в [1]. В настоящата публикация ще използваме усреднени данни за отделните показатели, с цел обобщаване на характерни особености в свойствата на скалите от изследваната зона.

I. 1. Якостни свойства

В таблици 1 и 2 са показани обобщените резултати от якостните изпитвания на пробните образци. В таблица 1 са дадени резултатите по литоложки разновидности на горележащите слоеве, получени при сондирането от повърхността. В таблица 2 са показани резултатите от подземните сондажи, прокарани в района на бл 150-360.

В обсега на проучвателните сондажи от повърхността са представени четири скални разновидности: червено-кафяви пясъкливи глинни, сиви пластични глинни, изветрели вулканити и силно променен андезит.

¹ Подробна информация в [1]

От резултатите в таблица 1 е видно, че най-високаплътност притежават андезитите и вулканитите $\gamma_{\text{ср}} = 0,025 - 0,026 \text{ MN/m}^3$. От глинестите слоеве, по-плътни са сивите пластични глини $\gamma = 0,024 \text{ MN/m}^3$, докато при червените пясъкливи глини $\gamma = 0,02 \text{ MN/m}^3$. Обратно на показателя плътност се изменя съдържанието на водата в образците. Най-високо, то е при червените глини ($W \approx 13,5\%$), най-ниско $W = 5-6\%$ във вулканитите.

Всички представени скални разновидности са с много ниски якостни показатели. Якостта на едноосов натиск $\sigma_{\text{с}}$ е в диапазона от 0,6 до 1,2 МПа. Най-висока, тя е при черве-

но-кафявите глини (1,2 МПа), най-ниска тя е при изветрелите вулканити - 0,57 МПа. При изследването са установени известни разлики в якостните показатели на едноименните разновидности скали от различните сондажи. Така например, червено-кафявите глини от сондажи DDH 382 и DDH 383 са малко, но устойчиво по-здрави от тези, в секция 12 (DDH 236 и DDH 238). Същата тенденция е установена и при якостните свойства на вулканитите. Тези, представени в сондаж DDH 382 са също с относително по-високи якостни показатели.

Таблица 1.

Обобщени показатели от якостните изпитвания за сондажите от повърхността, по литоложки разновидности

Литоложка разновидност	Сондаж №	Обемна плътност, γ , [MN/m ³]	Якост на ЕН $\sigma_{\text{с}}$, [Мпа] мин. макс. средно	Якост на опън $\sigma_{\text{т}}$, [МПа] мин. макс. средно	Кохезия, C^* , [МПа] (при върхова якост) мин. макс. средно	Кохезия, C [МПа] (онс)	Ъгъл на вътрешно триене, ϕ^* , [...°] (при върхова якост) мин. макс. средно	Ъгъл на вътрешно триене, ϕ , [...°] (онс)
Червенокафяви пясъкливи глини	DDH 236 DDH 238	0,02	0,46 1,23 0,96	0,14 0,20 0,17	0,13 0,25 0,2	0,3	35 52 44	26
Червенокафяви пясъкливи глини	DDH 382 DDH 383	0,02	0,66 1,54 1,2	0,11 0,21 0,15	0,13 0,28 0,2	0,53	41 55 48	8
Сиви пясъкливи глини	DDH 382 DDH 383	0,02	0,63 1,42 0,97	0,21 0,46 0,32	0,18 0,4 0,28	0,2	33 34 34	27
Изветрели вулканити	DDH 382	0,026	0,62 1,1 0,83	0,11 0,30 0,21	0,13 0,291 0,21	0,24	39 48 41	24
	DDH 392	0,025	0,35 0,77 0,57	0,06 0,43 0,17	0,06 0,29 0,05	0,14	28 58 36	24
Силно променен андезит	DDH 383	0,025	0,45 0,93 0,7	0,05 0,29 0,12	0,08 0,26 0,15	-	35 59 50	-

Таблица 2.

Обобщени показатели от якостните изпитвания за подземните сондажите, по литоложки разновидности

Литол. разновидност Местоположение	Сондаж №	Обемна плътност, γ , [MN/m ³]	Якост на ЕН σ_c , [MPa] мин. макс. средно	Якост на опън σ_t , [MPa] мин. макс. средно	Кохезия, C^* [MPa] (при върхова якост) мин. макс. средно	Кохезия, C [MPa] (онс)	Ъгъл на вътрешно триене, ϕ^* , [...°] (при върхова якост) мин. макс. средно	Ъгъл на вътрешно триене, ϕ , [...°] (онс)
Брекча неокварцена Бл 150 – 360	C-03 – 209		38,8 50	3,4 6,3	5,7 8,9		51 67	
		0,027	44	4,4	6,9	6	61	35
Брекча окварцена Бл 150 – 360	C-03 – 211		54,2 50,7	5,4 11,7	8,7 15,3		45 68	
		0,028	69,5	8,5	11,8	9	56	37

Всички изследвани разновидности са с много ниска якост на опън, изменяща се в диапазона $0,1 \div 0,3$ МПа. Скалите, изграждащи проучвания участък имат ниска граница на отношението σ_c/σ_t , което за различните изпитвания се изменя от 3 до 8. Най-високо – над 8 е при червено-кафявите пясъкливи глини и най-ниско, приблизително 3 е при вулканитите от раздробената зона, в обсега на сондаж DDH 392.

Изследването установява, че опитните резултати се изменят съществено, тъй като пробните образци имат изразена слоестост. Това обстоятелство предполага анизотропия на якост в зависимост от ъгъла сключван между посоката на приложения товар и ориентацията на слоевете, относно осите на сондажите.

Подземните проучвателни сондажи пресичат две литоложки разновидности – неокварцени и окварцени брекчи, които по якостно-деформационни свойства съществено се отличават, както от описаните по-горе скали, така и между себе си.

Резултатите показват, че окварцената брекча е по-плътна от неокварцената. Тя е съществено по-здрава, като $\sigma_c^{\text{ок}} \approx 70$, съответно срещу $\sigma_c^{\text{неок}} \approx 44$ МПа. Окварцената брекча е с приблизително два пъти по-висока якост на опън и също толкова по-високо сцепление: $\sigma_t \approx 8,5$, срещу 4,4 МПа и $C^* \approx 12$, срещу 7 МПа. Съответно съотношението σ_c/σ_t е по-високо при неокварцената брекча.

При якостните тестове и двете разновидности брекча, имат поведение на крехки скали, с хомогенен състав, не съдържащи нарушения. Разрушаването, с пренебрежими изключения се реализира при малки пластични деформации, чрез надлъжни пукнатини, по направление на прилагания товар.

1.2. Паспорт на якост. Параметри на обвиващата крива. Деформационни изследвания

Построяването на паспорта на якост, изразяващ графично зависимостта между тангенциалните и нормалните напре-

жения, при които настъпва разрушаването е завършващия етап за всяко якостно изследване. Елементарният паспорт се строи в координатна система $\tau - \sigma$, в която пределните Морови окръжности съответстват на σ_c и σ_t , допирателната към тях е обвиваща и нейното местоположение в координатната система се определя от точката на пресичането ѝ с оста τ , което дава сцеплението C . Ъгълът на наклона на обвиващата се определя от ъгъла на вътрешно триене ϕ . Описаните построения са извършени в [1] и параметрите на обвиващата крива са дадени в таблици 1 и 2 с индекс C^* и ϕ^* и са наричани кохезия и ъгъл на вътрешно триене при върхова якост. Проблемът е, че този подход дава завишени стойности за C и ϕ [3, 4] и въпреки отделни развития на аналитичния апарат, възможностите за приложение на резултатите по определянето на C и ϕ се движат в границите на $(0,2 - 0,5)\sigma_c$ [3, 4]. В смисълът на изложеното, построяването на паспорт на якост в условията на обемн натиск [5, 6], даващ връзката между тангенциалните τ и нормалните напрежения σ за различни напрегнати състояния ($\sigma_1 - \sigma_3$) е най-информативен [2, 3, 4].

Най-добрите практики при якостните изследвания са извършените в клетки за обемни изпитвания [6], които се правят със скъпо оборудване. Известен е метод за определяне паспорта на якост в условията на обемн натиск, състоящ се в изследвания на изменението на якостта на образци, с отношение $h_{\text{обр.}}/d_{\text{обр.}}$, изменящо се от $0,2 \div 2,0$ [3].

Получените резултати от тези експерименти са в съгласие със зависимостта:

$$\sigma_1 = f(\sigma_c, \sigma_c'/\sigma_c^i, h/d), \quad (1)$$

където σ_c е якост на едноосов натиск при $h/d=2$; σ_c' , σ_c^i са якост на едноосов натиск при съответното отношение h/d .

Описаният метод, проверен и приложен от нас в [7] е използван и в настоящото изследване. На фиг. 1 е показан обобщен паспорт на якост за най-здравите горележащи скали (червенокафявите пясъкливи глини). На фиг. 2, паспорта на най-слабите (изветрели вулкани) скални разновидности представени по проектното трасе на наклонената шахта.

Въз основа на тези построения са определени и параметрите на обвиващата крива в условията на обемн натиск, дадени в таблица 1 като C и φ в условията на онс, непосредствено до стойностите на C^* и φ^* , при върхова якост.

На фиг. 3 е показан обобщен паспорт на якост, построен за образци неокварцена брекча, получени от подземния сондаж С-03 – 209.

Изложеното по-горе относно предимствата на паспорта на якост, построен за различни видове напрегнати състояния е в сила и за скалите в района на подземните сондажи. Получените характеристики са сходни с тези от по-стари изследвания на здравите скали на находище "Челопеч", вместващи рудните тела в дълбочина. Разликите са в мащабите на натоварване, якостите и съответно в параметрите на обвиващите на паспортите на якост.

Върху здравите скали от подземните сондажи, съгласно условията на договора, са извършени деформационни изследвания за построяване на $\sigma - \varepsilon$ диаграми и определяне на характеристиките им на деформиране. Изследванията са извършени в условията на едноосов натиск и скорост на натоварване в границите $0,5 \div 1,0$ MPa/sec. Изпитванията са в обхват не превишаващ $0,6 - 0,7 \sigma_c$ за дадения образец скална разновидност, определян от резултатите по определянето на якостта на едноосов натиск. Точността на отчитане на деформациите е $0,001$ mm.

Във всеки деформационен експеримент, товарът е изменян циклично, като във всеки цикъл на натоварване

и/или разтоварване то е реализирано стъпалообразно и са определяни деформационните характеристики, след което образеца е разрушаван [2]. На фигура 4 са показани обобщени пълните $\sigma - \varepsilon$ диаграми, характеризиращи деформируемостта на образците от двете разновидности брекча, пресечени от сондажа С-03 – 209. На фигурата графиките на деформиране са наложени за двата вида образци брекча от зоните на относително ниска (неокварцена) и висока (окварцена) якост, за сравнение.

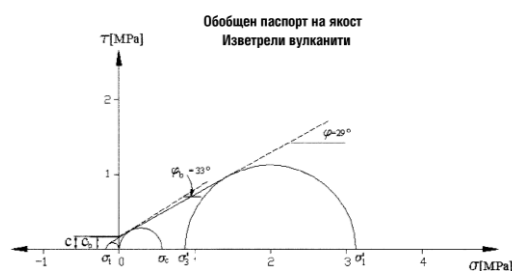
От $\sigma - \varepsilon$ диаграмите е видно, че основната част от микроредфектите, съдържащи се в образците се затварят при товари около $4 \div 5$ MPa, отбелязани с ниско разположените пунктирни линии на графиките.

В процеса на повишаване на натоварванията окварцените разновидности брекча имат линейно-еластично деформационно поведение, което се запазва до товари $17 \div 23$ MPa. При повторните натоварвания, на образците от неокварцената брекча, пропорционалността между прилаганите товари и деформациите се нарушава, нарастват напречните деформации и графиката губи линейния си характер, като това деформационно поведение е типично и за останалите изследвани образци [1]. За целите на сравнението получените $\sigma - \varepsilon$ диаграми са представени в класически вид и са маркирани само зоните на липса на линейност в началния участък (долните пунктири) и допределната зона (горните пунктири), без да се строят участъците на натрупващите се остатъчни деформации при повторните натоварвания.

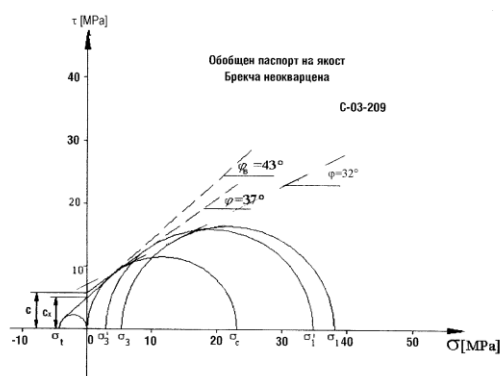
В таблица 3 са дадени стойностите на еластичните константи, получавани в цикъл на разтоварване, в зоната около $0,5 \sigma_c$ за отделните изпитвания [2].



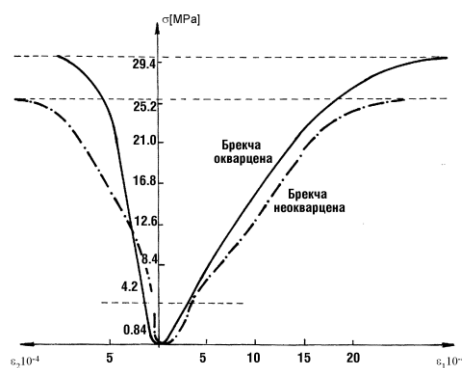
Фиг. 1.



Фиг. 2.



Фиг. 3.



Фиг. 4.

Таблица 3.

Деформационни характеристики на скалите от подземните сондажи

Литоложка разновидност	Якост на ЕН, σ_c , [Мра]	Модул на еластичност, Е, [Гра]	Модул на плъзгане, G, [ГПа]	Коефициент на Поасон, ν_{cp}
Брекча неокварцена	23	6÷11	5÷9,2	0,38
Брекча окварцена	30	7÷16	5÷13	0,35
	64	4÷15	3÷11	0,28

Въз основа на анализ тези резултати са определени и параметрите на обвиващата крива, които са $C \approx 6 - 11$ Мра и $\varphi = 21 \div 27 - 37^\circ$, за различните обемни напрегнати състояния.

Заклучение

Извършени са комплексни якостни и деформационни изпитвания на скалите, изграждащи покриващия комплекс, над източния участък на находище "Челопеч". Придобита е нова информация за физикомеханичните свойства на четири литоложки разновидности на горележащите скали, в обсега на проучвателните сондажи, прокарани от повърхността. Извършени са якостни и деформационни изследвания на две разновидности брекча в района на бл.150 – 360. Всички образци характеризират скалите в зоната на трасето на проектирана наклонена шахта.

При изследването е преследвана целта да се реализират качествени лабораторни тестове за получаване на първи, обхватни по обем количествени данни, достатъчни за първоначален анализ и приложение в началния етап на проекта.

Получените резултати са подлагани на статистическа оценка по надеждност и представителност, подробно изложени в [1], където броят доставени образци позволява прилагането й.

В смисълът на изложеното са дадени и препоръки към авторите на проекта за допълнителни изследвания, налага

гани от изискванията за гарантиране на устойчивостта на съоръжението с дълговременен срок на експлоатация, каквато е наклонената шахта и установяване на характерни особености за свойствата на скалите. Тези препоръки се отнасят за резултати, при които надеждността на определяне е в граници $P=0,77 - 0,94$ за наземните 0,61-0,86 за образците от подземните сондажи. Реализираното изследване е в сила само за околността на проучвателните сондажи и не позволява екстраполация извън районите на секциите, в които се намират те.

Извършеното изследване увеличава качеството и обема количествена информация за свойствата на скалите от находището и е в унисон с програмата на "ЧЕЛОПЕЧ-МАЙНИНГ" АД за създаване на база данни по геомеханика за НДС и свойствата на скалите, изграждащи масива.

Литература

- Определяне на якостните и деформационни характеристики на скали от находище "Челопеч", чрез изследване на сондажни ядки. Изследователски отчет по Договор 1816/2003, НИС при МГУ "Св. Иван Рилски", София
- Brown E. T. Editor "Rock Characterisation. Testing and Monitoring. ISRM Suggested Methods. Pergamon Press, 1981.
- Турчанинов И.А. и др. "Основы механики горных пород" Недра, 1989.
- Bienjowski Z.T. "Estimating the strength of rock materials. J.of S. A Inst of Min Sc.: N 4, 1964.
- Smith M.Y. "Concise Soil Mechanics" M & E Handbooks, London, 1977.
- Hoek E.P., K. Kaiser, W.F.Bawden. "Support of Undergronnd Exavations in Hard Rock, 1994, A.A. Balkema.
- Определяне на якостните и деформационни характеристики на комплекса покриващи скали на находище "Челопеч", чрез изследване на ядки от сондажи от повърхността" Изследователски отчет по Договор 1729/2001, НИС при МГУ "Св. Иван Рилски", София.