



КОМБИНИРАНО (ОТКРИТО-ПОДЗЕМНО) РАЗРАБОТВАНЕ НА РУДНИ ПОЛЕЗНИ ИЗКОПАЕМИ В Р. БЪЛГАРИЯ – МИТ ИЛИ РЕАЛНОСТ?

проф. Георги Михайлов
МГУ Св.Ив.Рилски e-mail: mihayg@mgu.bg

РЕЗЮМЕ

Представена е концепция за комбинирано (открито-подземно) разработване на рудни находища. Разгледано е нестандартно решение, когато разкриващите изработки на подземния рудник са разположени в чашата на открития рудник. Посочени са природните и минно-технически фактори, влияещи върху избора на оптимално решение. Разгледана е добивна технология със запълване, която носи елемент на творческа иновация (еманация). Без да се споменават конкретни обекти, статията визира възможностите за комбинирано (открито-подземно) разработване в условията на двата най-големи действащи рудника в България: Асарел и Елаците.

Ключови думи: Комбинирана добивна технология, структурна нарушеност на масива, разкриващи изработки, технология със запълване, геомеханична оценка.

COMBINED (OPEN PIT-UNDERGROUND) MINING TECHNOLOGY FOR BULGARIAN'S ORE DEPOSITS - MYTH OR REALITY?

Georgi Mihaylov

ABSTRACT

A concept for combined (open pit – underground) development is presented. A nonstandard solution is considered when the underground mine developments are located in the “cup” of open pit mine. The natural and mining technical factors, affecting the choice of an optimal solution are indicated. A mine fill technology, who has an element of creative emanation is considered. Without mentioning specific objects, this paper refers the possibilities for combined development of the two largest active mine in Bulgaria: Assarel and Elatsite.

Keywords: Combined (open pit-underground) mining; rock mass discontinuity; mine developments; filling mining method; geotechnical assessment.

1. Въведение

Характерна особеност за разработване на полиметални рудни находища е прилагане на комбиниран начин на изземване. Могат да се посочат множество примери в световната практика, но най-големи мащаби в комбинираното открито-подземно разработване са постигнати в Канада, Австралия, Русия, Казахстан. Основателно възниква въпросът: Следвайки аналогията със световната практика ще се приложи ли комбинираната схема на разработване в двата най-големи открити рудници у нас за добив на полиметални рудни полезни изкопаеми? На този въпрос отговорът не е еднозначен. Затова и заглавието на настоящата статия е формулирано така многозначително... Следва да се подчертае, че още през 70-те години на миналия век са се водили дискусии за целесъобразността на комбинирания добив у нас. Тогава преобладават отрицателните оценки, въз основа на които категорично е утвърдено мнението, че въпреки огромното количество на запасите – около 200×10^6 t, комбинираната схема на разработване за условията на рудник „Медет“ е неприложима. Богатият производствен опит, който беше натрупан с разработване на рудник „Медет“ даде възможност откритият рудодобив да достигне към днешна дата уникални производствени технико-икономически



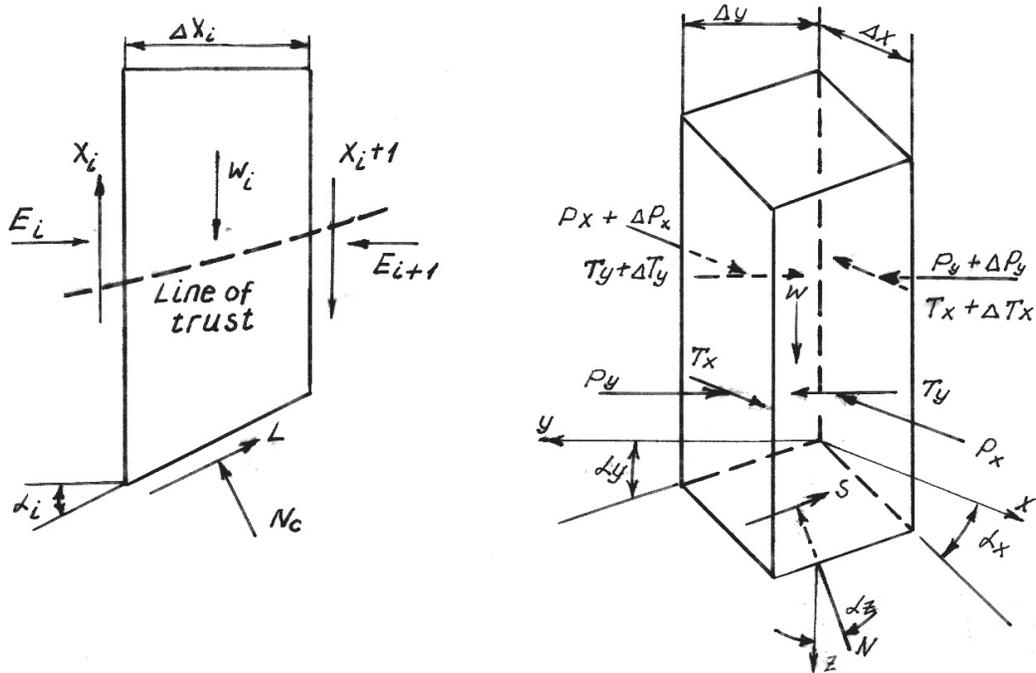
показатели, съпоставими с най-високите световни стандарти. Това дава основание отново да се постави въпросът за комбинирана схема на разработване вече при съвършено други условия:

- наличие на частна собственост в рудодобива;
- действащ концесионен договор и правила за корпоративна и социална отговорност;
- рязък скок в развитието и усъвършенстването на минно-добивните технологии.

Преминаването от открит към подземен добив има огромно предимство: изучаване до съвършенство на природните условия и установяване на закономерностите за тяхното изменение при по-нататъшно развитие на минните работи. Практиката показва, че най-често проектите за разработване на подземната част са окончателно завършени преди финализиране на минните работи в открития рудник. Така се постига плавно преминаване от единия етап към другия, като определянето на производствената мощност на рудника при новите условия е многовариантна оптимизационна задача. Изследването на възможността за подземно разработване на двата най-големи открити рудници за добив на полиметални руди у нас е във от съмнение на своята актуалност. И двата рудника са достигнали апогея на своето развитие като открита добивна технология. Досега обаче няма индикации за предприета изследователска работа за преминаване към разработване на останалата част от запасите по подземен начин. Какъвто и да е резултатът от едно такова изследване, очакваните технико-икономически показатели ще бъдат факт в несъвсем обозримо бъдеще. Тогава наред с големите предимства, свързани със степента на изученост на природните условия, съществува огромен недостатък: не е ясно какво ще бъде влиянието на конструкцията на подземните минни работи върху устойчивостта на открития рудник; не е ясно как ще бъде използвана съществуващата инфраструктура и изградените производствени мощности на повърхността; не е ясен необходимият финансов ресурс за изграждане на подземния рудник и колко време ще продължи неговото строителство. Тези три групи основни технико-икономически проблеми формират комплексния характер на изследването. В крайна сметка читателят ще бъде в състояние сам да си отговори на въпроса защо мит или реалност е комбинираното разработване на рудни полиметални находища у нас.

2. Оценка на структурната нарушеност на масива като фактор, влияещ върху устойчивостта

При разработване на рудни находища по комбинирана схема (открито-подземно) от природните фактори най-съществено влияние оказва структурната нарушеност на масива. Тя е представена от 3 до 5 системи пукнатини, които определят размера и формата на елементарния структурен блок, а следователно и неговия обем. При открито разработване интерпретацията на поведението на елементарния структурен блок и по-конкретно неговата кинематика се залага в изчислителните схеми при определяне на ъглите на бордовете на открития рудник. Използват се различни практики за изчисляване на ъглите, но задължително условие е въвеждането на т.н. коефициент на устойчивост. Този коефициент е гарант за ефективността на откритото разработване, следвайки функционалната зависимост на коефициента на откривка и производствените разходи за добив на 1t руда. Съвместното открито-подземно разработване изисква използване на по-висок коефициент на устойчивост в сравнение с всяка технологична схема, основаваща се само на открития добив. Тогава възниква въпросът: как да се преодолее противоречието с коефициента на устойчивост Куст? Частично това противоречие може да се неутрализира със значението на коефициента на запаса Кзап, който проектантите задължително използват, най-вече заради голямата степен на неопределеност на показателите, залагани в изчислителните схеми. Друг своеобразен лост са използваните осъвременени методи за решаване на задачите, свързани с устойчивостта, например Теорията на пределното равновесие в условия на 3D постановка на задачата. На фиг.1 е показана принципна изчислителна схема за търсене на решението.



Фиг.1 Принцилна схема на задачата съгласно Теорията на пределното равновесие (3D) решение.

Известно е, че един от най-сложните въпроси, свързани с избор на модел на изчислителна схема, е определяне на показателите, заложи на входа на тези модели. От една страна са общоприетите методи за определяне на показателите на механичните свойства на скалите в лабораторни условия. От друга страна е структурната нарушеност на масива. Всеобщо убеждение е, че показателите на механичните свойства в реалния масив представляват $0.1 \div 0.3$ от показателите, определени в лабораторни условия. Това несъответствие се дължи именно на структурната нарушеност на масива. Налага се корекция и тя може функционално да се изрази чрез $K_{стр}$. За определяне на сцеплението на масива C_m - един от най-широко използваните якостни показатели в изчислителните схеми, се прилага изразът [1].

$$C_m = C_0 + \frac{C - C_0}{1 + a \ln\left(\frac{H}{h}\right)} \quad (1)$$

където: C е сцеплението, определено върху монолитни образци в лабораторни условия;

C_0 – сцеплението по контактните повърхнини на пукнатините;

H – размер на обекта, за който се определят свойствата на изследвания масив;

h – среден размер на елементарния структурен блок (средно разстояние между пукнатините);

a – коефициент, зависещ от якостта на натиск, определена върху образци в лаб. условия.

Подобни изрази са изведени за определяне на деформационните показатели: модул на еластичност E_m , коефициент на Поасон μ_m , модул на срязване G_m или в най-общ вид коефициентът на структурна нарушеност може да се представи във вида:

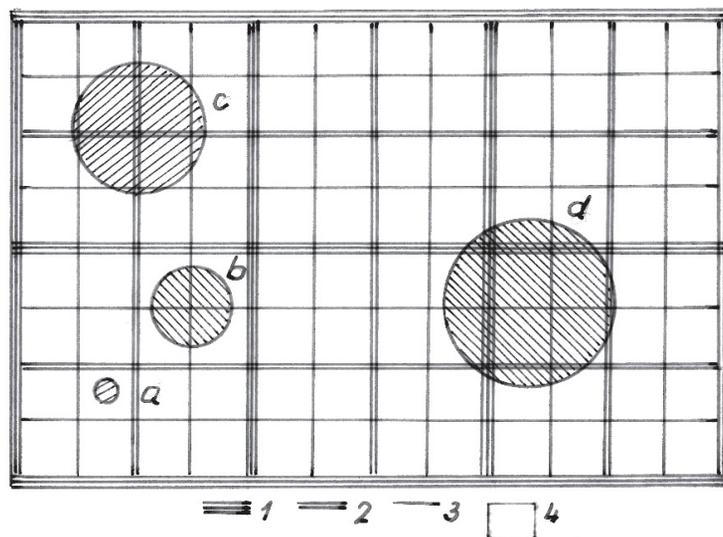
$$\frac{A_m}{A_{лаб}} = K_{стр} \quad (2)$$

където: A_m и $A_{лаб}$ са показателите, характеризациякостните и деформационни свойства, съответно в масива и в лабораторни условия. Опитно е доказано, че $K_{стр}$ се изменя в интервала $[0.2 \div 0.8]$.

Отношението H/h във формула (1) обвързва геометричните размери на дадено съоръжение с реалните параметри на структурната нарушеност на масива, върху който е изградено то. Известно е, че най-общо тектонските нарушения се класифицират по четиристепенна скала от 1 до 4. На най-крупните нарушения съответства порядък „1“, а на пукнатините, характеризиращи нееднородността на средата – порядък „4“.



На фиг.2 е показана пространствената връзка между отделните видове нарушения [2]. Например конструктивен елемент с линейни размери a_1 отчита нееднородността на средата, представена от 3 до 5 системи пукнатини т.е. напуканост от „четвърти“ порядък. Конструктивен елемент с размери a_2 ($a_2 > a_1$) отчита нееднородност от „трети“ порядък: свойства на нееднородност на средата и нарушения от „трети“ порядък. Аналогично, конструктивни елементи с размери a_3 и a_4 , където $a_3 > a_2$ и $a_4 > a_3$ отчитат нееднородност от „втори“ порядък плюс нееднородности от „трети“ порядък и нееднородността на средата („четвърти“ порядък) или нееднородност от „първи“ порядък, нееднородност от „втори“ порядък, нееднородност от „трети“ порядък, нееднородност на средата („четвърти“ порядък). За нуждите на рудничното проектиране съответно при открит и подземен добив се отчитат нарушенията от „четвърти“, „трети“; („втори“ порядък евентуално). Диаграмата на структурната нарушеност на масива, показана на фиг.2, изяснява физическата същност на K_{cmp} . Тя дава отговор на въпроса за широкия диапазон, в който се изменя K_{cmp} , особено когато се анализират деформационните характеристики на средата. Със своята обективна даденост той притежава способността да бъде управляващ фактор в процедурата за избор на оптимално решение.



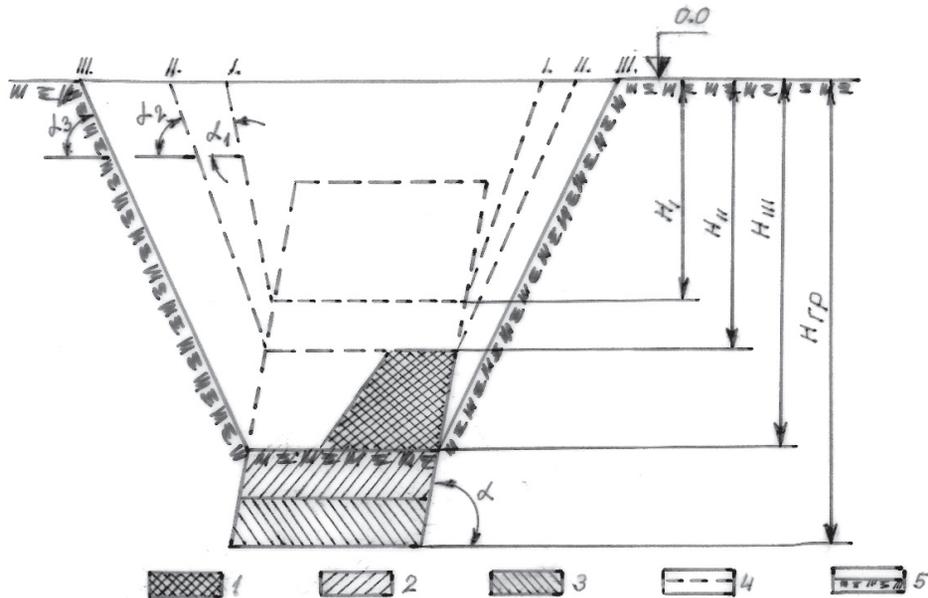
Фиг.2 Структурна схема на масива по [2]; 1-4 нееднородност на масива от първи до четвърти порядък; $a-d$ деформируемост на минно-технически обекти с различни линейни размери

Така посочените три лоста инициират намирането на технологично решение за комбинирано открито-подземно разработване, което няма аналог в световната практика. То ще бъде разгледано в следващия параграф.

3. Технологично решение за комбинирано (открито-подземно) разработване

Три са възможните схеми за комбинирано (открито-подземно) разработване: Последователно разработване на запасите в открития и след това в подземния рудник; Паралелно разработване в открития и подземния рудник; Последователно разработване във възходящ ред, т.е. минните работи най-напред се извършват в подземния рудник, а след това в открития. И при трите технологични схеми необходимото условие е наличие на проект за цялостно разработване на запасите в границите на даденото находище. За условията на двата най-големи открити рудници у нас такъв цялостен проект липсва. Ето защо тук се предлага технологично решение в случай, че комбинираното (открито-подземно) разработване стане факт.

На фиг.3 е показана принципна схема.

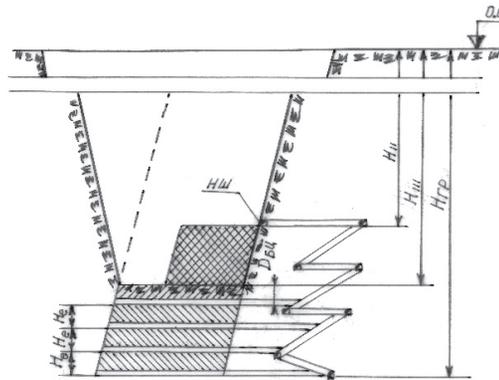


Фиг.3 Технологично решение за комбинирано (открито-подземно) разработване: α_1 , α_2 , α_3 ъгъл на наклона на борда на открития рудник през различните етапи на разработване; α - ъгъл на наклона на рудното тяло; H_I гранична дълбочина при начало на проектиране на подземния рудник, H_{II} гранична дълбочина при начало на строителство на НРК за подземния рудник, H_{III} гранична дълбочина на развитие на открити минни работи, $H_{ГР}$ гранична дълбочина на разработване по комбинирана схема; 0.0 нулева кота; 1- целик за разполагане на НРК за подземния рудник; 2- целик за разделяне на откритите от подземните минни работи; 3- запаси подлежащи на разработване по подземен начин; 4- контур на рудното тяло през различните етапи на разработване по открит начин; 5- контур на минните работи в края на разработване по открит начин.

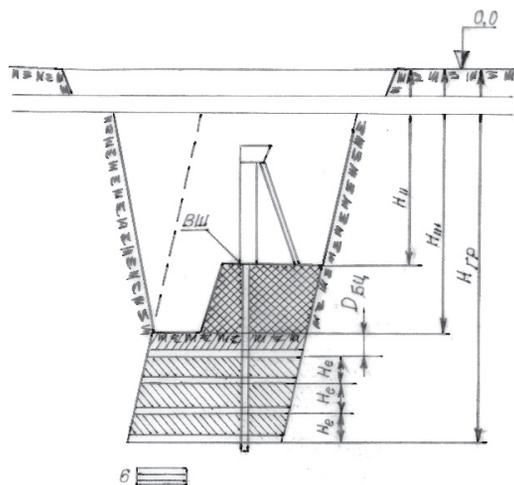
Съгласно техническия проект за разработване на открития рудник са известни граничната дълбочина на рудника, ъглите на борда на открития рудник, начина на разкриване, системата на разработване. Разкриващите изработки за подземния рудник трябва да бъдат разположени в чашата на открития рудник. За целта трябва да се оформи целик, върху който да се разположат устията на разкриващите изработки. Това налага да се въведат три нива в открития рудник: Първо ниво с дълбочина H_I – съответства на началото на проектиране в подземния рудник; Второ ниво с дълбочина H_{II} – съответства на началото на строителство на Надземния рудничен комплекс (НРК), включително прокарването на разкриващите изработки. Трето ниво с дълбочина H_{III} – съответства на началото на разработване на подземния рудник (долна граница на открития рудник съгласно действащия работен проект). Четвърто ниво с дълбочина $H_{ГР}$ съответства на граничната дълбочина за развитие на минните работи при комбинирано (открито-подземно) разработване. Като ограничаващо условие за достигане на дадено ниво ще се използва скоростта на понижаване на минните работи изразена в т/год. Едно от предимствата на предлаганата технологична схема е използването на съществуващата инфраструктура на открития рудник за транспорт на рудата до обогатителната фабрика и обслужване на подземния рудник. След окончателното изземване на запасите в границите на подземния рудник ще се пристъпи към ликвидиране на целика чрез технология с открити минни работи. В случая не може да има технически проблем, тъй като транспортните изработки от дъното на открития рудник до Второ ниво съществуват. Денивелацията ($H_{III}-H_{II}$) оформя обем, чието изземване ще бъде предмет на последния етап от разработването на общото руднично поле. В зависимост от планираната производствена мощност на подземния рудник ще бъде избрана схемата на разкриване. На фиг.4 и фиг.5 са показани схеми на разкриване съответно с вертикална и наклонена шахта. Всяка една от тези схеми има специфични особености за изграждане на НРК, което ще се отрази на експлоатационните разходи за приемане на рудата и транспорт до обогатителната фабрика. За проветряване на подземния рудник и за осигуряване на втори изход ще бъде необходимо прокарване на една-две



спомагателни шахти. Предпочитан вариант е прокарването на вертикални шахти с относително неголямо сечение, заложени извън границите на минните работи.



Фиг.4 Схема на разкриване на подземния рудник с наклонена шахта; H_e височина на етаж при подземно разработване; $D_{БЦ}$ дебелина на барьерния целък за отделяне на откритите от подземни минни работи; 5- разположение на подземните минни изработки; останалите означения са същите, както на фиг.3.



Фиг.5 Схема на разкриване на подземния рудник с вертикална шахта; означенията са същите, както на фиг.3 и фиг.4.

Изборът на място на разполагане на НРК на подземния рудник ще наложи изменение на избрания коефициент на сигурност при проектиране на бордовете на открития рудник. За да се сведе до минимум влиянието на подземните минни работи е необходимо НРК на подземния рудник да бъде разположен по осовата линия, определяща най-голямата стабилност на масива. Тя винаги е перпендикулярна на линията на най-голямата подвижност, зависеща от параметрите на структурната нарушеност: брой системи пукнатини, тектонски нарушения от трети и четвърти порядък (вж.&2).

Освен начинът на разкриване и изборът на място за разполагане на разкриващите изработки, същността на технологичното решение за комбиниран добив включва и изборът на технология на добива в подземния рудник. Възможни са две технологични схеми: с обрушаване и запълване. Първата схема е неприемлива най-малко по две причини: Предвижда се използване на съществуващата инфраструктура на открития рудник, а това означава запазване на неговата конструкция до окончателно завършване на минните работи. Втората причина е свързана с високите якостни показатели на рудата и страничните скали, които ги прави трудно обрушаеми според съществуващите класификации на масива. Следователно, технологията със запълване на добивното пространство няма алтернатива. Това означава по-големи експлоатационни разходи за подземен добив. Ниските



съдържания на полезните компоненти в рудата, респ. невисоката и ценност може да доведе до компрометиране на комбинираното (открито-подземно) разработване. Освен това, прилагането на технология със запълване изисква бариерен целик за изолиране на откритите от подземните минни работи (вж фиг.4 и фиг.5). Предвижда се бариерният целик, заедно с целика, върху който е изграден НРК, да се изземат с открити минни работи в последния етап на съществуване на рудника.

4. Геомеханична оценка на масива

Практическата реализация на така представената технологична схема за комбинирано разработване поставя като първостепенна задача геомеханичната оценка на масива през различните етапи на развитие на минните работи.

4.1 Начално напрегнато състояние на масива

Дългогодишното разработване на дадено находище по открит начин дава възможност да се изяснят предпоставките за наличие на аномалии в напрегнатото състояние на ненарушения масив. Тези аномалии могат да се дължат на пресечения планински релеф, наличието на крупни разломни линии (вж фиг.2), степента на нееднородност в механичните свойства на рудата и страничните скали, анизотропния характер на деформационните свойства, причинени главно от напукаността. Разработването на открития рудник довежда до преразпределение на напреженията в масива. Съгласно принципа на суперпозицията следва да се определят изходните напрежения, действащи в зоната на подземните минни работи. Съществуват множество класификационни характеристики, определящи качеството на масива. Натрупаният практически опит показва, че класификационната характеристика на Laubscher дава отговор на въпроса за начина на прокарване на подготвителните изработки и начина за управление на скалния натиск при дадена система на разработване.

4.2 Оценка на степента на удароопасност на масива

Морфологичните особености на рудните тела показват, че са възможни технологични схеми за разработване с изземване на ленти или отбиване от подетажни изработки. Едно от големите предимства на комбинираното разработване е наличието на скален материал, складиран в скалните насипища или хвостохранилищата. Той е отличен материал за производство на запълвачна смес, необходима за запълване на добивните пространства в подземния рудник. Както се посочи, преразпределението на действащите напрежения ще изисква детайлно изучаване на степента на удароопасност на скалния масив. Очакваното количество енергия, която може да се освободи се определя по формулата:

$$U = \frac{\sigma^2}{E} \quad (3)$$

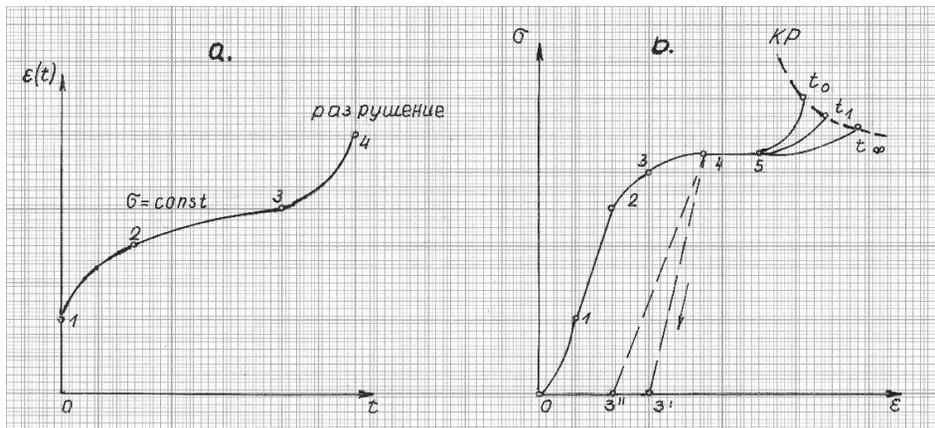
където: σ е тензорът на напрежение в разглежданата точка;

E – модулът на еластичност.

Като се вземе под внимание количеството на отбитата руда, т.е. получената ново открита повърхнина за едно взривяване, може да се определи относителното количество на освободената енергия – MJ/t, а от кумулативната крива да се определи общото количество на освободената енергия в рамките на наблюдавания период. Първото, макар приблизително изчисление, може да се извърши при отчитане на геостатичния товар γH (γ – обемно тегло, H – дълбочина на разработване). В реални условия, за сметка на голямото преразпределение на напреженията, количеството енергия U следва да бъде много по-голямо. Образуват се зони с висока концентрация на напрежения. Те от своя страна са източник на интензивни деформационни процеси, довеждащи масива до състояние на текучество – явлението, което е в същността на възникване на скални удари. Преходът от еластична деформация към пластично поведение е съпроводено с период на затихване на деформациите. Тази аномалия се обяснява с възникналия ефект на заздравяване, причинен от дилатансията, съотношението между



еластичната деформация и общата деформация, фактора „време“ за протичане на деформационния процес. На фиг.6 е показано поведението на масива в условие на пълзене, т.е. деформациите ε са представени във функция от времето t . На лице са четири зони: зона на еластично поведение 0-1; 1-2; 2-3; 3-4 съответно зони на затихващи, установени и нарастващи деформации. Точка 4 съответства на разрушаване.



Фиг.6 Зони, характеризиращи поведението на масива при натоварване по [3]; а. общ вид на кривата на пълзене $\varepsilon=f(t)$; ε -относителна деформация; t -време; σ -напрежение; 0-1 еластична деформация; 1-2; 2-3; 3-4 съответно участъци на затихваща, установена и прогресивно нарастваща деформация (пълзене); б. общ вид на зависимостта между напрежението σ и относителната деформация ε ; 0-1 еласто-пластично поведение, свързано със затварянето на пукнатините; 1-2 еластично поведение $\sigma=E\varepsilon$; 2-3 нелинейно еластично поведение $E\neq\text{const}$; 3-4 пластично-еластично (при отнемане на натоварването деформацията съответства на т. 3'), а с течение на времето на т. 3''); 4-5 състояние на пластично течение $\sigma=\text{const}$; $\varepsilon\neq\text{const}$; 5 пластично течение $\varepsilon=f(\sigma;t)$; t -продължителност на натоварването; t_0 -мигновено, t_1 -крайна стойност на натоварване, t_∞ -натоварването клони към безкрайност; КР – крива на разрушаването.

От изложеното става ясно, че два показателя определят степента на удароопасност на масива: количеството специфична енергия, освободена при разрушаване U и времето t , необходимо за нейното освобождаване. Специфичната енергия на разрушаване може да се определи съгласно израза:

$$U = \int_{i=1}^n \sigma_i \varepsilon_i \quad (4)$$

където i е индексът на съответния стадий на деформиране.

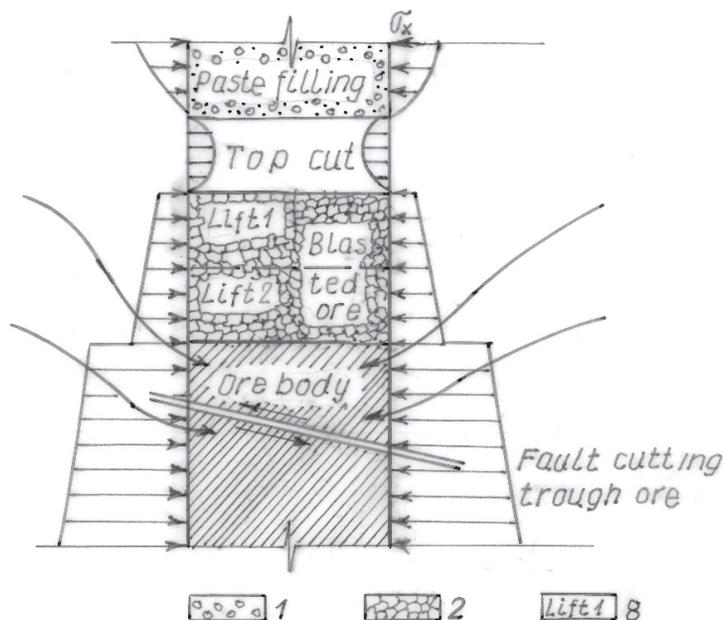
За определяне на напрегнатото и деформирано състояние (НДС) на масива са необходими серия от полеви изследвания, отнасящи се както за открития рудник, така и за подземния. Скални масиви, за които делът на еластичните деформации са повече от 70% от общите деформации при разрушаване се считат за удароопасни. Определянето на степента на удароопасност на скалите при комбинирано разработване е необходимо условие при избора на подходяща добивна технология за подземния рудник. Очакваното преразпределение на действащите напрежения, наличието на здрави скали с крехко поведение при разрушаване, ефектът на въздействие на ПВР са фактори, довеждащи до значително натрупване на еластична енергия. Начинът за нейното освобождаване е необходимото условие за безопасна работа, а това изисква изборът на съответната система на разработване, която трябва да отговаря и на още едно условие: висока ефективност.

5. Система на разработване за условията на подземния рудник

Разработването на находища в здрави, но напукани скали е съпроводено с редица минно-технологични ограничения. При комбинирано (открито-подземно) разработване следва да се прибави високият градиент на действащите напрежения, характерни за условията на големи дълбочини. Налице са аргументи, които показват, че технологиите със запълване на добивното пространство нямат алтернатива. Този, макар и категоричен извод, следва да покаже, че технологиите с обрушаване,



включително принудително обрушаване, имат ограничено приложение в световната практика и се изключват от по-нататъшно разглеждане в настоящата статия. Допълнително предимство за технологията със запълване е наличието (в неограничено количество) на скален материал, необходим за производство на запълвачна смес. Високият градиент на напреженията задължително изисква оценка на степента на удароопасност на масива (вж §4.2). В рамките на добивния блок са приложими както възходящо, така и низходящо изземване. На фиг.7 и фиг.8 са показани принципни схеми на низходящо изземване, на фиг.9 е показана схема с възходящо изземване. Най-характерна особеност и за трите схеми се явява сложната картина на разпределение на действащите напрежения. Нееднородният строеж на масива (запълвачен материал, странични скали, руда) в комбинация с високите стойности на нормалните и тангенциални напрежения са основният източник за наличие на аномалии. Сравнявайки градиентите на хоризонталните напрежения се установява, че най-сложно е разпределението при възходящия ред на изземване (вж фиг.9). Над добивното пространство се оформя зона на разрушаване (broken zone), влияеща върху безопасността на работа. По-плавно е разпределението при низходящия ред на изземване – вариант „дълги забои“ (вж фиг.8). В този случай високият градиент може да доведе до подуване на пода на добивната изработка (yielded zone), което също е предпоставка за влошаване на безопасността. Така се достига до технологичната схема, показана на фиг.7 – система със запълване, вариант „затворено стъпало“. Макар да са използвани идеи, развити в [4], тази схема притежава елементи на творческа еманация, представена за първи път от автора.

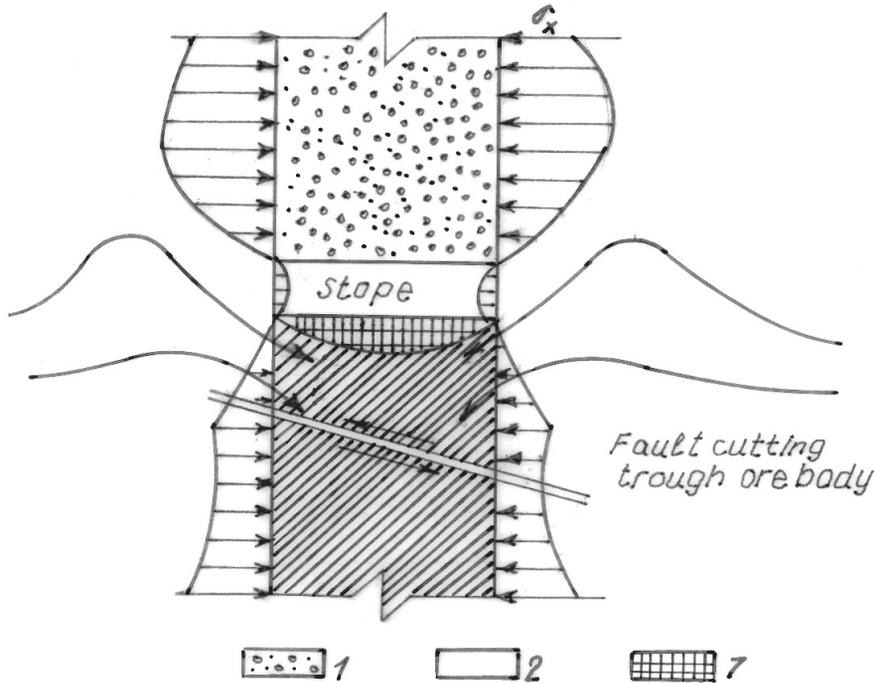


Фиг.7 Напрегнато състояние на масива при запълване и низходящ ред на изземване, вариант „затворено стъпало“; 1- paste filling; 2- blasted ore; 8- пореден номер на изземваната лента; останалите означения са съгласно фиг.9.

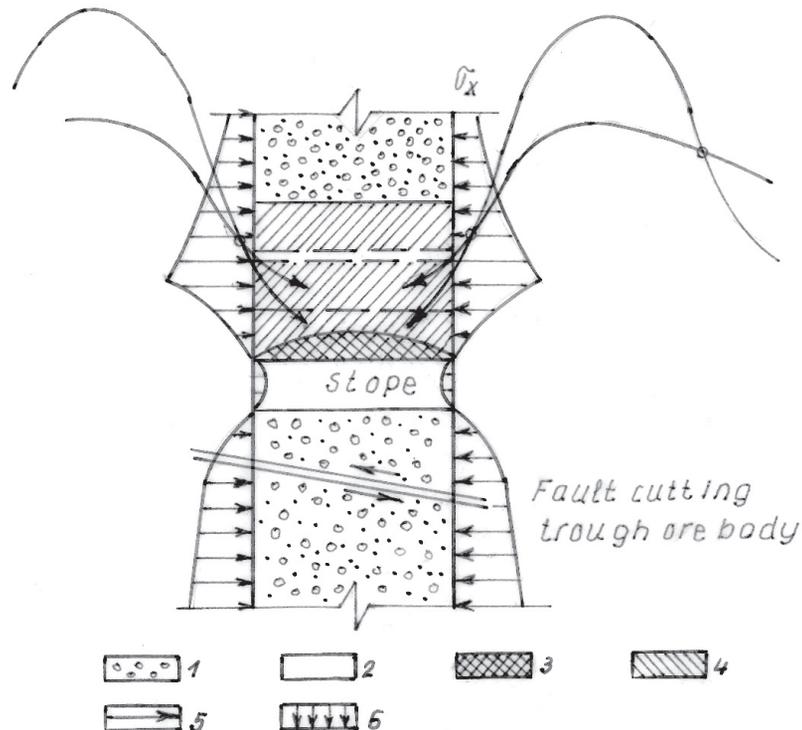
В условия на висока удароопасност на рудата и страничните скали низходящият ред осигурява до голяма степен управлението на процесите в масива чрез механичните свойства на втвърдяващото (пастово) запълнение. Това не е достатъчно за постигане на по-ефективно разработване. Същността на предлаганата технологична схема е оформянето на три стъпала. От най-горното стъпало (top cut) се пробиват дълбоки взривни дупки в низходящ порядък с дълбочина, съответстваща на височината на следващите две стъпала. След взривяване отбитата руда служи като „възглавница“, която ефектно „гаси“ напреженията в добивното пространство. Лентата (стъпалото), от което са пробити и взривени дълбоките взривни дупки (top cut), се запълва по утвърдената технология. Рудата се изземва последователно отгоре надолу, като машината за натоварване и доставка „стъпва“ върху отбития материал. Паралелно с изземване на второто стъпало (Lift1) се закрепват страничните стени с анкери и



мрежи, след което се изнемва и третото стъпало (Lift2) по аналогичен начин. Най-голямото предимство на тази технологична схема (вж фиг.7) е предпоставката за увеличаване на производителността на добивния блок за сметка на едновременно отбиване на рудата в две стъпала: Lift1 и Lift2.



Фиг.8 Напрегнато състояние на масива при запълване и низходящ ред на изнемване; 1- paste filling; 2- stope; 7- yielded zone; останалите означения са съгласно фиг.9.



Фиг.9 Напрегнато състояние на масива при запълване и възходящ ред на изнемване; 1- paste filling or hydraulic filling; 2- stope; 3- broken zone; 4- orebody; 5- характеристика на градиента на хоризонталните напрежения; 6- диаграма на разпределение на хоризонталните напрежения



Това условие беше поставено в началото на параграф §3, където заедно с изискването за безопасна работа се постави въпросът за производствената мощност на обединения рудник.

6. Четири стъпки за реализация на решението за комбинирано разработване

Същественото различие между специфичните особености на открития и подземен добив изискват въвеждане на определен брой стъпки за реализация на всяко конкретно решение на комбинирано (открито-подземно) разработване. При тях ключовата дума е проектиране, като изчислителният процес трябва задължително да достига до избор на оптимално решение.

Excavation design-stope design. Два основни начина познава световната практика при разработване на запасите под чашата на открития рудник. Това са технологиите с обрушаване и запълнение. Като се отчитат качествата на масива: високи якостни показатели, способност на скалите да акумулират значително количество потенциална енергия, технологиите с обрушаване са неприемливи за практиката в България. Технологиите със запълване предлагат повече варианти. А изкуственият запълвачен материал, благодарение на своите деформационни способности (своята податливост), е в състояние да намали действащите напрежения в конструктивните елементи на системата на разработване. Другият признак, на който трябва да даде отговор технологията на подземните минни работи е начинът на отбиване на рудата: използват се къси взривни дупки, дълбоки взривни дупки и сондажи. Голямата дебелина на рудните тела, разработвани по открит начин, е предпоставка за прилагане на сондажно отбиване в условията на подземния рудник. Това гарантира достигане до висока производствена мощност – едно от задължителните условия при преминаване от открит към подземен добив. Същевременно, взривните работи са източник на допълнителна сеизмична енергия, която прибавена към действащите напрежения в конструктивните елементи може да доведе до преждевременното им разрушаване. На противоположния полюс са технологиите с къси взривни дупки. Тясно предимство е намаляване на обедняването, което има значителен икономически ефект. Използването на дълбоки взривни дупки стои в средата на тази своеобразна скала. Ниските производствени разходи и голямата мобилност на машините са основни аргументи при избора на начин на отбиване на рудата (вж §5 – система на разработване).

Modelling for mine design. Втората стъпка се основава на широко използване на численото моделиране при оразмеряване на открити добивни пространства, реда на изземване на запасите (възходящ, низходящ), определяне на механичните свойства на изкуствения запълвачен материал, градиента на действащите напрежения при съвместното открито-подземно разработване. Съвременните програми за ЕИМ позволяват числените методи да се използват за решаване на задачи с неправилни форми на рудните тела, с голяма степен на нееднородност, заложен в изчислителните схеми. Разработени са съвременни алгоритми, които позволяват решаване на нелинейни задачи от теорията на еластичността. С тяхна помощ може да се определи последователността на изземване при разделяне на слоеве и подетажи.

Stope reconciliation. Това е третата стъпка. Оформянето на добивните пространства изисква задължителна оценка на тяхното отклонение от проектните размери. В специфичните подземни условия се натрупват бази от данни, въз основа на които могат да се определят факторите, влияещи върху настъпилото несъответствие на технологичните параметри. Извеждат се графики, чиито кумулативен характер позволява да се определи развитието на технологичния процес във времето и най-важното: да се предвиди настъпването на критичния момент на разрушаване. Следва да се подчертае, че това направление бурно се развива както в подземния добив, така и в открития рудник. Наличието на комбинирано (открито-подземно) разработване позволява натрупаните данни да се интерпретират в условията на обща система. Известни са платформи, вкл. комплексни програми, регламентиращи начина за събиране, обработване и анализиране на наличната геомеханична и геотехническа информация. Задължително изискване е тяхната адаптивност към оценката на риска, probabilistic ground support design, seismic response to mining, control measures. Все повече увеличаващите се практики на комбинирано открито-подземно разработване показват, че тази стъпка (conciliation) ще има все по-категорично значение при избора на технологично решение.



Pillar design. Необходимостта от четвъртата стъпка се основава на факта, че в подземния рудник се използва множество целици с различно предназначение. Две са базисните хипотези, върху които се градят изчислителните схеми: теглото на скалите до повърхността (геостатичния товар) и теглото на скалите в границите на т.н. свод на естествено равновесие. Най-широко приложение за оразмеряване на целиците са получили изчислителните методи, основаващи се на теорията на пределното равновесие, разпределението на действащите напрежения, определени *in situ*, експериментални измервания, свързани с поведението на масива под влияние на тангенциалните и нормални напрежения при наличие или отсъствие на сцепление със страничните скали. Проектирането на целиците задължително се обвързва с приетия коефициент на запаса $K_{зан}$. Според предназначението и срока на съществуване на дадена група целици $K_{зан}$ се изменя в границите от 1.2 до 1.8. Налице е т.н. конфликтна ситуация. По-голямата стойност на коефициента на запаса намалява риска, но съществено влошава технико-икономическите показатели: загуби, срок на съществуване на рудника и пр. Практиката показва, че коефициентът на формата K_{ϕ} – отношението между височината h и неговата дебелина d пряко влияе върху коефициента на устойчивост $K_{уст}$. Ето защо, за нуждите на проектирането задължително следва да се изведе зависимостта между коефициента на устойчивост и коефициента на формата. Тази зависимост е толкова по-представителна, колкото по-голям е броят на наблюдаваните обекти (примерно няколкокостотин поддържащи целика в границите на дадено руднично поле).

7. Заключение

Представеният доклад съвсем не изчерпва комплексния характерна изследването за комбинирано (открито-подземно) разработване, но той дава основание да се направят следните изводи:

- Комбинираното разработване е класически пример на оптимизационна задача. Той изисква поставянето на многовариантен подход за избор на решение, основаващо се на комплексна многокритериална оценка.

- През трите етапа на разработване, включващи открит, подземен добив и преходен период, се натрупва значителен обем информация за равнището на пет коефициента: коефициент на устойчивост $K_{уст}$; коефициент на запаса $K_{зан}$; коефициент на откривка K_o ; коефициент на формата на целиците K_{ϕ} ; коефициент на структурна нарушеност K_{cmp} . Стойностите на някои от тях са обективна даденост, а други имат субективен характер. Те са обаче с решаващо влияние върху равнището на технико-икономическите показатели и могат да се считат като средство за управление на добивната технология.

- Реалното определяне на дълбочините H_I , H_{II} , H_{III} , H_{ep} (вж фиг.3) ще осигури ефективността на предлаганата технологична схема със залагане на разкриващите изработки на подземния рудник в чашата на открития рудник.

- Високите механични показатели на рудата и страничните скали са признак за тяхната характеристика като удароопасни. Затова технологията със запълване няма алтернатива за подземния рудник.

- Разглежданите три технологични схеми на работа в добивния забой осигуряват висока степен на безопасност. Едната от тях – система със запълване и низходящ ред на изземване, вариант „затворено стъпало“ имат елемент на творческа еманация. Условното разделяне на три стъпала е предпоставка за висока производителност на добивния блок.

- Инструменталните наблюдения са неразривно свързан елемент с добивната технология. Изменението на действащите напрежения и от там на градиента $[\text{grad } \sigma_x]$ е необходим и достатъчно обективен критерий за доказване на целесъобразността от прилагане на технология със запълване и низходящ ред на изземване.

Изводите показват, че в проучванията е необходимо да се включат такива важни раздели като изучаване на сеизмичната характеристика на масива, управление на финансовите ресурси за реализиране на технология с комбинирано разработване, оценка на риска и др. С оглед доказване на



целесъобразността от прилагане на комбинирано (открито-подземно) разработване те биха могли да бъдат обект на бъдещи изследвания.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баклашов, И.В. (2004) Геомеханика. Том 1, Основы геомеханики. Издательство МГГУ. Москва.
2. Турчанинов, И.А., М.А. Йофис, Э.В.Каспарьян. (1977) Основы механики горных пород. Недра, Ленинград.
3. Именитов, В.Р. (1984) Процессы подземных горных работ при разработке рудных месторождений. Недра, Москва.
4. Williams, T.J., Brady, T.M., Bayer, D.C., Breen, M.J., Pakalnis, T.R. Underhand cut and fill Mining as a Practiced in Three Deep Hard Rock Mines in the United States. Hecla Mining Company.
5. Hanrahan, SRK Consulting, Australia. Setting it up for success: consideration for caving projects. Caving 2022-Y.Potvin (ed). Australian Center for Geomechanics, Perth, pp 3-18.