



УДК 549; 549.1

Г.К. Бекенова

Институт геологических наук им. К.И.Сатпаева, г.Алматы

**ОБЪЕКТЫ И ТРАДИЦИОННЫЕ МЕТОДЫ МИКРОМИНЕРАЛОГИИ.
ПРАКТИЧЕСКИЕ ПРИЕМЫ В СТРУКТУРНОМ ИЗУЧЕНИИ МИКРОМИНЕРАЛОВ**

Структурные исследования микроминералов проводятся дифракционными методами рентгенографии, электронографии и электронной микроскопии. В основу этих методов положены явления дифракции рентгеновских и электронных лучей на кристаллах [1-6].

Зная химический состав, можно решить главный вопрос структурных методов о полной расшифровке кристаллической структуры минерала с помощью структурной информации, переданной дифракционными характеристиками на точечных, кольцевых электронограммах, электронограммах от косых текстур (ЭКТ), порошковых рентгенограммах и рентгенограммах от монокристаллов.

По типу объектов, используемых в изучении, рентгенографические методы сбора дифракционных данных принято разделять на порошковые и монокристальные. С помощью порошковых методов решаются задачи диагностики минерала, определения его элементарной ячейки, качественного и количественного фазового анализа, определения средних размеров кристаллов в образце, оценки дефектности кристаллов, изучения текстур и др. К порошковому методу изучения минералов с ограниченным количеством вещества относится метод с использованием фотографического способа регистрации рентгенограммы (фотометод).

Для расшифровки кристаллической структуры минерала используют монокристальную дифрактометрию, задачей которой является определение координат атомов в элементарной ячейке. Исследования базируются на индивидуальной регистрации дифракционных отражений от каждой системы атомных плоскостей. Для этой цели используют автоматические четырехкружные монокристальные дифрактометры. В настоящее время структурное определение возможно на монокристаллах с размерами зерен до 2 мкм при использовании сфокусированного монохроматического синхротронного излучения. Сложность состоит в поиске совершенных микромонокристаллов.

Подготовка образцов для рентгеновского анализа (фотометод). Во избежание потери вещества с помощью ультразвуковой иглы под оптическим микроскопом отбирают пробу для препарата либо непосредственно из образца, либо с аншлифа или со шлифа, предварительно сняв у последнего покровное стекло [7]. Отобранное таким образом вещество для дифракционного изучения в рентгеновской камере Дебая-Шеррера (РКД) «закатывают» в резиновый шарик или столбик. При таком препарировании требуется незначительное количество вещества, которое можно отбирать прицельно с интересующих участков зерна минерала. Кристаллики препарата должны быть не более 0,01 мм, иначе набор ориентаций, формирующих рефлекс на рентгенограмме, будет недостаточным. Для увеличения набора ориентаций препарат во время съемки врашают.

Рентгеноструктурный анализ становится неинформативным при наличии «рентгеноаморфных» образцов, размеры зерен в которых менее 1 мкм (рис.1), или при полном отсутствии структурной упорядоченности в веществе. В первом случае на помощь исследователю приходит просвечивающая электронная микроскопия (ПЭМ). В связи с более интенсивным взаимодействием электронов с веществом и малой длиной волны по сравнению с рентгеновским излучением, дифракция электронов позволяет расширить границы изучения кристаллического состояния вещества в сторону высоких степеней дисперсности. Увеличение в электронных микроскопах лаборатории физических и химических методов исследования института достигает 400.000, а разрешающая способность составляет 4 Å по решетке. С увеличением ускоряющего напряжения длина волны электронов уменьшается, что ведет к улучшению разрешающей способности прибора. Информация, полученная в результате рассеяния электронов при прохождении их через препарат, фиксируется в виде электронно-микроскопических снимков (рис. 2) и электронограмм (рис. 3-5). С помощью микродифракции от частиц препаратов, приготовленных методами суспензий или экстракционных реплик, можно, рассчитывая параметры элементарной ячейки, идентифицировать минералы; исследовать полиморфные фазовые превращения; изучать продукты распада твердых растворов и многое др. А наличие энергодисперсионного спектрометра позволяет определять химический состав изучаемых микрокристаллов.

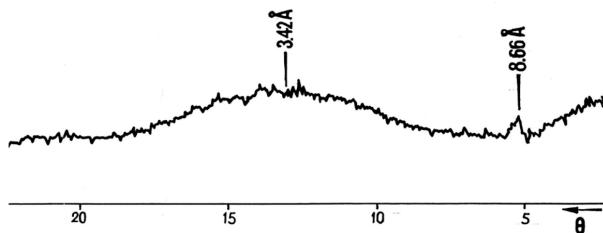


Рис.1. Дифрактограмма «коллоидного» образования. Обр.М-266, месторождение Баласаускандык, Южный Казахстан. (Дифрактометр ДРОН-2,0; $\text{Cu}K_{\alpha}$ излучение, 35 кВ, 20 мА).

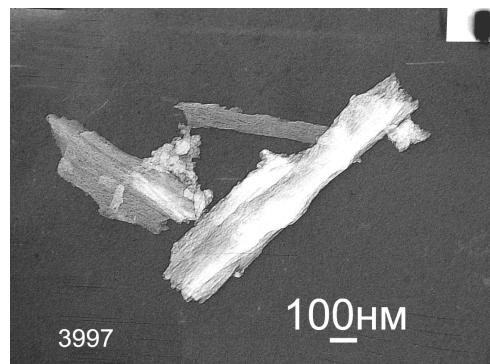


Рис.2. Электронно-микроскопический снимок русаковита. Частицы минерала имеют вид волокнистых щепок. Месторождения Баласаускандык, Южный Казахстан. (Электронный микроскоп JEM-100CX, ускоряющее напряжение 100 кВ).

Минералы с преимущественной ориентацией сложно изучать методом рентгеновской

дифрактометрии, так как их частицы (пластинчатые или игольчатые), располагаясь наиболее развитой гранью или осью удлинения параллельно пленке-подложке, образуют текстурированные препараты. Для их исследования применяется метод электронографии.

По типу объектов, используемых в электронографическом изучении (по аналогии с рентгеновским анализом), принято различать методы:

1. Микродифракцию, когда в образовании дифракционной картины участвует моно-кристалл. В этом случае получаем точечную электронограмму (рис.3).

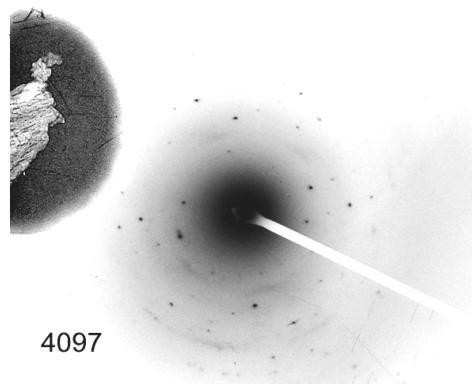


Рис.3. Точечная электронограмма от частицы русаковита. Месторождение Баласаускандақ, Южный Казахстан. (Электронный микроскоп JEM-100CX, ускоряющее напряжение - 100 кВ).

2. Собственно электронографический, когда электронный луч дифрагирует от участка поликристаллического текстурированного препарата, образуя кольцевую дифракционную картину. Конструктивно в приборе это достигается отсутствием электромагнитных линз на пути следования дифрагированных лучей. Если электронный луч падает на поликристаллический препарат перпендикулярно и в дифракции принимает участие большое число ориентированных микрокристаллов, то в результате имеем дело с обычной кольцевой электронограммой (рис. 4). Когда препарат находится под углом к падающему электронному лучу, получаем электронограмму от косой текстуры (ЭКТ) (рис. 5).

При изучении тонкодисперсных глинистых минералов на ЭКТ визуально выявляются такие тонкие особенности кристаллической структуры, как степень ее совершенства, полигипная модификация, ди- или триоктаэдричность – тип октаэдрической сетки, указывающий на степень заселения октаэдров катионами (Al , Fe^{3+} , Fe^{2+} , Mg , Li и др.), заполнение межслоевого пространства и т.д., не говоря уже о точной диагностике принадлежности структуры минерала к каолинитоподобным, слюдоподобным слоям или хлоритовым пакетам [2].

Препараты для электронной микроскопии получают методом осаждения из суспензии дисперсного вещества на пленку-подложку. Обычно используют углеродные пленки, получаемые распылением угольных стержней на гладкую поверхность с последующим отделением и помещением пленок на сетку-подложку. Для исключения влияния среды, в которой готовят суспензию, применяют метод «сухого препарирования», когда изучаемый материал наносится на пленку-подложку без диспергирования.

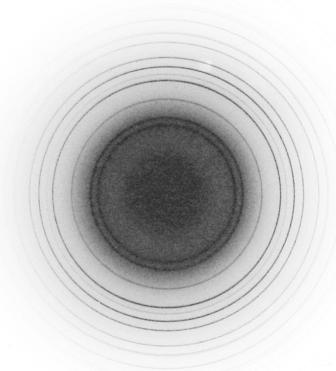


Рис.4. Кольцевая электронограмма гипса. Кара-Чагыр, Южная Киргизия. (Электронограф ЭМР-100М, ускоряющее напряжение - 100 кВ).

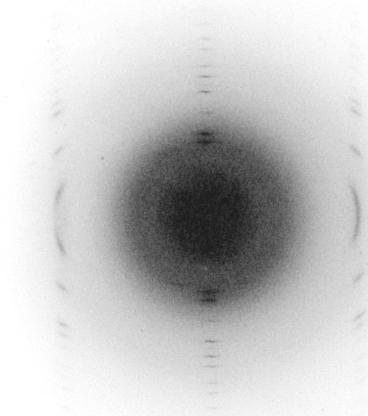


Рис.5. Электронограмма от косой текстуры гипса. Угол наклона препарата 60°. Пространственные рефлексы образуют слоевые линии. Кара-Чагыр, Южная Киргизия. (Электронограф ЭМР-100М, ускоряющее напряжение - 100 кВ).

В отличие от рентгеноструктурных методов, при использовании которых препараты не претерпевают каких-либо изменений в приборах, электронно-микроскопические и электронографические исследования, проводимые в условиях высокого вакуума, сопровождаются структурной перестройкой неустойчивых водных минералов. В качестве примера можно привести расчет параметров элементарной ячейки изученного нами нового минерала - митряевита – водного фосфата алюминия и фтора [8-11]. Рассчитанные по ЭКТ параметры элементарной ячейки: c , углы α и β не совпадают с рентгеноструктурными данными [9]. Расхождение в параметрах объясняется следующим образом. Митряевит – водный минерал – в условиях вакуума электронографа теряет межслоевую воду. При этом структура сжимается, что сопровождается уменьшением значения параметра c и искажением углов α и β . При продолжительном тепловом воздействии электронного луча на

микрокристаллы происходит более глубокая структурная перестройка, связанная с потерей конституционной воды. Это явление, вплоть до полной аморфизации микрокристаллов митриванита, можно было наблюдать визуально в электронном микроскопе. Частицы минерала всучивались, и, по мере разрушения их кристаллической решетки, микродифракционная точечная картина исчезала.

Интересные результаты были получены при электронно-микроскопическом изучении «рентгеноаморфных» образований. На дифрактограмме одного из них – зеленого алсифосита (название по содержанию основных элементов – Al, Si, P) (обр. М-266) из месторождения Баласаускандык (Южный Казахстан) – имеются два диффузных рефлекса с межплоскостными расстояниями 8,66 Å и 3,42 Å (рис.1). Эти образования из зоны окисления ванадиеносного горизонта углеродисто-кремнистой формации Северо-Западного Карагату были объектами исследований не одного поколения минералогов. Предыдущие исследователи называли их коллоидными образованиями и отмечали присущие им общие характеристики: стекловатый облик, раковистый излом, обилие трещин дегидратации и тончайших пустот, создающих в отдельных агрегатах своеобразную опалесценцию и гигроскопичность, высокую отдачу воды на поверхности образцов с распадом их на ряд острогольных кусочков, бесструктурное натечно-колломорфное или микроглобулярное сложение агрегатов, их изотропность и рентгеноаморфность. Также отмечалась их однородность, выражаящаяся в однотипности окраски, характере блеска, твердости, удельного веса и показателей преломления. В этих образованиях дисперсионная среда – слабосвязанная вода – достигает 35-40 % от общего веса и выделяется в температурном интервале от 0 до 350 °C [12].

Химический состав алсифосита (обр. М-266) изучен нами на электронно-зондовом микроанализаторе Superprobe JCXA-733 (см. табл.). Анализы проводились при ускоряющем напряжении 15 кВ, токе зонда 25 нА и расфокусированном (диаметр 15 мкм) зонде. В качестве стандартов использовались: альбит (Na), MgO (Mg); Al₂O₃ (Al); SiO₂ (Si); InP (P); FeS₂ (S); адуляр (K); CaSiO₃ (Ca); TiO₂ (Ti); металлический V (V); Fe₂O₃; MnO (Fe). Аналитик П.Е. Котельников).

Химический состав (вес. %) зеленого алсифосита (обр. М-266)

Анализ	O	Na	Mg	Al	Si	P	S	K	Ca	Ti	V	Fe	Σ
1	55,57	0,61	0,15	15,25	3,86	11,06	0,66	0,76	2,93	0,30	0,28	0,79	92,22
2	53,70	0,19	0,27	15,51	4,17	9,96	0,40	0,13	3,37	0,30	0,32	0,67	89,00

При электронно-микроскопическом исследовании препарата, подготовленного методом «сухого препарирования», были выявлены формы, размеры тонкодисперсных частиц и наличие в них кристаллического строения. В основной массе препарат алсифоситового состава состоит из рыхлых комковатых частиц различного размера (рис.6), округлых «пузырчатых» образований. Встречаются наноразмерные частицы, слоистые частицы и частицы в виде пленок [13].

На данном этапе исследований можно говорить о многофазном криптокристаллическом образовании алсифоситового состава и наличии в нем самых разнообразных по

форме микро и наноразмерных частиц как аморфных, так и имеющих кристаллическое строение. Для выявления и идентификации с последующей систематизацией кристаллических фаз потребуется серьезная работа с применением высокоразрешающего электронного микроскопа, оснащенного аналитической приставкой и программами анализа изображения, с помощью которых можно установить форму, химический состав, структуру и её дефекты, число атомных слоев и др. в изучаемых объектах.

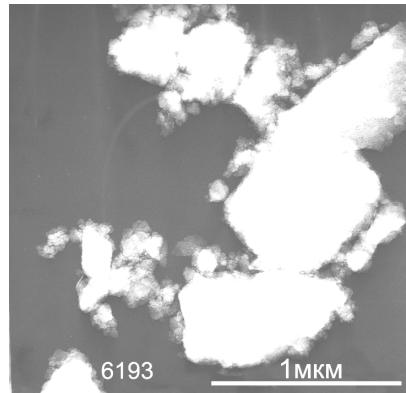


Рис.6. Электронно-микроскопический снимок. Частицы криптокристаллического образования ал-сифоситового состава. Обр. М-266. Месторождение Баласаускандык, Южный Казахстан. (Электронный микроскоп JEM-100CX, ускоряющее напряжение - 100 кВ). Аналитик Т.А. Шабанова.

В заключение необходимо отметить, что для исследователя, изучающего микро- и наноразмерные минералы с ограниченным количеством вещества, важно знать не только возможности аналитических методов, но и как рационально их применить для получения максимальной информации, характеризующей объект исследования.

Список литературы

1. Порай-Кошиц М.А. Практический курс рентгеноструктурного анализа. - Т.2. - 1960. - 631 с.
2. Звягин Б.Б. Электронография и структурная кристаллография глинистых минералов. - М.: Наука, 1964. - 280 с.
3. Методы электронной микроскопии минералов. - М.: Наука, 1969. - 311 с.
4. Электронная микроскопия в минералогии. - М.: Мир, 1979. - 541 с.
5. Гаранин В.К., Кудрявцева Г.П. Применение электронно-зондовых приборов для изучения минерального сырья. - М.: Недра, 1983. - 216 с.
6. Пушаровский Д.Ю. Рентгенография минералов. - М.: МГУ, 2000. - 296 с.
7. Левин В.Л. Ультразвуковое устройство для приготовления препарата из мелких включений // Известия АН Каз.ССР. Сер. физ.-мат. - 1984. - №4. - С.82-83.
8. Ankinovich E.A., Bekenova G.K., Shabanova T.A., Zazubina I.S., Sandomirskaya S.M. Mitryaevaite, $\text{Al}_{10}[(\text{PO}_4)_{8,7}(\text{SO}_3\text{OH})_{1,3}]_{\text{Si}_{10}}\text{AlF}_3 \cdot 30\text{H}_2\text{O}$, a new mineral species from a Cambrian carbonaceous chert formation, Karatau range and Zhabagly mountains, Southern Kazakhstan // Canadian Mineralogist. 1997. Vol.35. P.1415-1419 (англ.).
9. Cahill C.L., Krivovichev S.V., Burns P.C., Bekenova G.K., Shabanova T.A. The crystal structure of mitryaevaite, $\text{Al}_{15}(\text{PO}_4)_{21}[(\text{P},\text{S})\text{O}_3(\text{OH},\text{O})]_2\text{F}_2(\text{OH})_2(\text{H}_2\text{O})_8 \cdot 6,48\text{H}_2\text{O}$, determined from a microcrystal using synchrotron radiation // Canadian Mineralogist. 2001. Vol.39. P.179-186 (англ.).
10. Бекенова Г.К. Митряева И.Т.: 1. История открытия и исследования минерала // Вестник КазНТУ. - 2005. - №1. - С. 50-55.
11. Бекенова Г.К. Митряеват: 2. Кристаллическая структура и связь с другими алюмофосфатами // Вестник КазНТУ. - 2005. - №4. - С. 17-21.
12. Анкинович Е.А., Анкинович С.Г. Коллоидные образования в пачке ванадиеносных сланцев Южного Казахстана // Сб. «Геология и разведка недр». - Алма-Ата: КазПТИ, 1973. - Вып.3. - С. 10-18.
13. Глаголев В.А., Левин В.Л., Шабанова Т.А., Котельников П.Е., Бекенова Г.К. Пер-

спективы и парадоксы казахстанской наноминералогии // ДАН НАН РК. - №2 (в печати).

Получено: 27.07.06.

УДК 661.854...22:666.3.032.4

Г.Д. Бицоев, Г.М. Мутанов

ВКГТУ, г. Усть-Каменогорск

**ОСОБЕННОСТИ СТРУКТУРООБРАЗОВАНИЯ ТЕРМОПЛАСТИЧНЫХ ШЛИКЕРОВ
ИЗ ОКСИДА БЕРИЛЛИЯ**

Для снижения токсичности технологических процессов за счет установления путей управления деформационным поведением высокотеплопроводных литейных масс состава: оксид берилия - термопластичная связка, были изучены особенности структурообразования и реологические свойства таких масс в зависимости от температуры и соотношения твердой и жидкой фаз. Одновременно оценивали характер механизма течения в исследуемых системах.

В процессе горячего литья технологический диапазон температур шликера лежит в достаточно широких пределах (20–80 °С). Поскольку компоненты связки в этом интервале температур меняют агрегатное состояние, а коэффициент температурного объемного расширения жидких сред составляет десятые доли процента на градус, изменение объема дисперсионной среды в процессе литья может быть весьма существенным, что, безусловно, должно оказывать влияние на объемно-фазовые соотношения в шликере, а следовательно, и на его реологию. Для определения реального соотношения твердой и жидкой фаз в литейных системах определяли температурные зависимости плотности связок и их составляющих в интервале 20–95 °С. Зависимости для составов, применяемых в производстве, представлены на рис. 1.

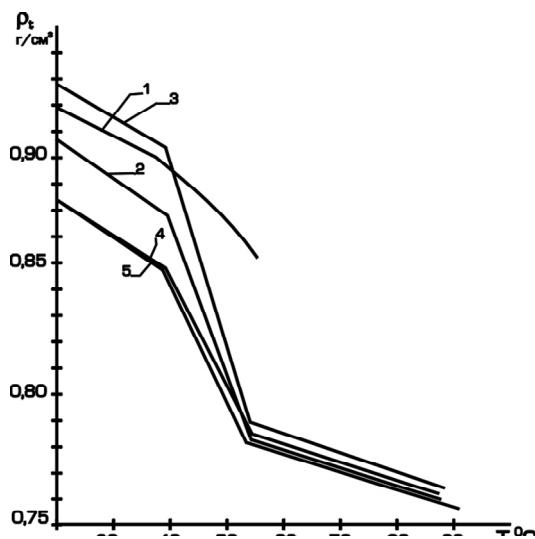


Рис. 1. Изменение плотности связок и их компонентов от температуры: 1- воск, 2 - парафин, 3 – 91 % парафин + 6 % воск + 3 % олеиновая кислота, 4 – 96 % парафин + 4 % воск, 5 – 99 % парафин + 1 % олеиновая кислота

Сопоставительный анализ кривой охлаждения парафина, воска (основных компонентов связки) и кривых охлаждения для других составов связок показывает их достаточно хорошее совпадение.

Во всех случаях выделяются три линейных участка, соответствующих объемному коэффициенту температурного расширения $1,2 \div 1,3 \cdot 10^{-3}$ 1/град (интервал менее 40 °C); $5,7 \div 7,5 \cdot 10^{-3}$ (интервал кристаллизации) и $0,45 \div 0,68 \cdot 10^{-3}$ (интервал выше 55 °C).

Температурная зависимость плотности (ρ_t) выше 55 °C (рабочий диапазон) носит линейный характер и может быть описана уравнением вида

$$\rho_t = a \cdot t + b, \quad (1)$$

где t – температура шликара; a , b – параметры.

Параметры этого регрессионного уравнения представлены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты статистической обработки зависимостей плотности связок от температуры в интервале 55 – 95 °C

Состав связки, % масс.			a 10^{-4} 1/град.	B	Коэффициент корреляции r	Стандартные отклонения	
Пара-фин	Воск	Олеин. кис-та				по t	по S 10^3
100	0	0	-5,8337	0,8118	0,9952	12,91	7,568

0	100	0	-8,3693	0,8913	0,9614	12,75	1,110
0	0	100	-6,1256	0,9370	0,9950	23,08	1,421
91	6	3	-6,4001	0,8227	0,9910	12,91	8,337
52	24	24	-6,2001	0,8516	0,9968	12,91	8,030
88	6	6	-5,9993	0,8256	0,9955	10,00	6,026
94	0	6	-5,6096	0,8138	0,9942	10,44	5,894
94	3	3	-5,5751	0,8130	0,9948	10,24	5,740

Дополнительно было оценено влияние скорости охлаждения на плотность связок при 25 °C (табл. 2). С этой целью термостатированную при 90 °C связку объемом 10 см³ в пробирке диаметром 14 мм охлаждали по трем различным режимам для обеспечения изменения критерия БИО в пределах 1,5 десятичных порядков.

Режим 1 - естественное охлаждение в термостате в течение 24 - 36 час.

Режим 2 - в холодной (2 – 4 °C) воде.

Режим 3 - охлаждение на воздухе (25 °C).

Таблица 2. Влияние режима охлаждения на плотность (г/см³) связок при 20 °C

Состав связки, % масс			Режим охлаждения		
Парафин	Воск	Олеиновая кислота	1	2	3
100	0	0	0,928	0,937	0,857
91	6	3	0,941	0,943	0,905
96	4	0	0,906	0,907	0,846

Влияние режима охлаждения обусловлено, в первую очередь, особенностями кристаллизации связки и образованием в случае реализации режима 3 внутренней усадочной раковины.

Термоциклизование связок в режимах «плавление - кристаллизация» приводит, независимо от режима охлаждения, к стабилизации их плотности после 5 - 6 циклов (рис. 2). Общее увеличение плотности при этом составляет (7÷8) 10⁻³ г/м³ или 0,8 - 1,0 %. Наибольшее повышение плотности характерно для состава: 96 % парафина и 4 % воска (0,013 г/см³). Такое увеличение плотности связки приводит к росту примерно на 0,4-0,5 % плотности заготовки, отформованной из шликера с 50 % объемной концентрацией твердой фазы, что достаточно хорошо коррелируется с соответствующими данными П.О. Грибовского [1].

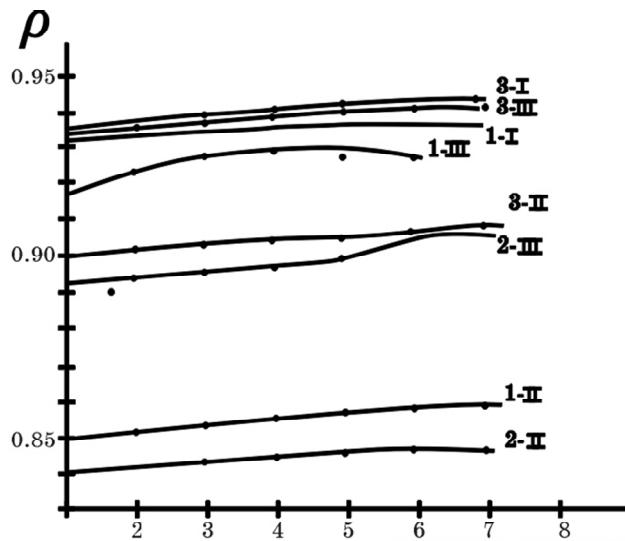


Рис. 2. Влияние количества циклов «нагрев - охлаждение» на изменение плотности связок состава: 1 - 100 % масс. парафин; 2 - 96 % масс. парафин, 4 % масс. воск; 3 - 96 % масс. парафин, 3 % масс. воск, 1 % масс. олеиновая кислота. (Числа (I-III) у кривых - режим охлаждения)

По результатам проведенных экспериментов было рассчитано объемное содержание % твердой фазы в интервале варьируемых в процессе работы значений содержаний связки (9,5 - 11,7 % масс) и температур (20 \div 75 $^{\circ}$ C) (табл. 3). Плотность связки при 80 $^{\circ}$ C принимали равной 0,770 г/см³, параметры «*a*» и «*b*» уравнения 1, равными $5,786 \cdot 10^{-4}$ и 0,8161, соответственно, а плотность твердой фазы – равной 3,05 г/см³ и независящей от температуры. Расчет вели по формуле

$$Cv = 1 - \omega \rho_{TB} [(1 - \omega) \rho_{SV} + \omega \rho_{TB}]^{-1}, \quad (2)$$

где ω - относительное массовое содержание связки в долях единицы; ρ_{SV} , ρ_{TB} - плотности связки и твердой фазы, г/см³.

Таблица 3. *Объемное содержание твердой фазы % шликеров различного состава в зависимости от температуры*

Температура, $^{\circ}$ C	Плотность связки, г/см ³	Содержание связки, % масс.				
		9,5	10,0	10,3	10,7	11,7
20	0,924	74,3	73,2	72,5	71,7	69,6
40	0,900	73,8	72,6	72,0	71,1	69,0
55	0,788	71,1	69,9	69,2	68,3	66,1
60	0,783	71,0	69,8	69,1	68,2	66,0
63	0,780	70,9	69,7	69,0	68,1	65,9

66	0,777	70,8	69,6	68,9	68,0	65,7
75	0,773	70,7	69,5	68,8	67,9	65,7

Объемное содержание твердой фазы в зависимости от состава и температуры колеблется в жидким шликере в интервале 5 % объемных и не превышает 71 %.

При этом приращение плотности связки в процессе охлаждения составляет 1,20, в том числе за счет охлаждения до 55 °C (условно принято за температуру начала кристаллизации) - 1,02, при кристаллизации (55÷40 °C) - 1,14 и от 40 до 20 °C - 1,03. То есть приращение плотности в твердопластичном состоянии (ниже 55 °C) - 1,17.

Для литейных систем эти приращения составляют соответственно: 1,05÷1,06, при этом в жидким состоянии приращение составляет около 1,01, твердопластичном - 1,05. Таким образом, на интервал ниже 55 °C (зона пластического состояния) приходятся 70÷80 % величины температурной усадки. Некоторое дополнительное уменьшение этого отношения (в пределах долей процента) может быть достигнуто варьированием состава связки.

Влияние объемного содержания твердой и жидкой фазы на реологию литейных систем изучали на шликерах с содержанием связки 10,0-11,7 % масс при температурах 42÷75 °C. Определение вязкости и предельного напряжения сдвига шликеров выполняли на ротационном вискозиметре. Пластическую прочность измеряли на конусном пластомере. Об объемно-фазовых соотношениях в литейных системах судили по изменению объемного содержания твердой (C_v) и жидкой (C_ω) фаз, критической концентрации твердой фазы в системе C_v^{kp} , доле кинетически свободной C_ω^k и кинетически связанной C_ω^{cs} жидкости. За критическую концентрацию твердой фазы в шликере принимали относительную плотность твердой фазы в осадке, полученном после 60 мин центрифугирования шликера при 90 °C. С этой целью осадок после охлаждения отделяли от связки, выдавленной на поверхность, и прокаливали при температуре 1000 °C. Затем по величине потерь при прокаливании определяли массовое содержание связки и пересчитывали этот показатель на объемное содержание дисперсионной фазы при 75 °C с учетом изменения плотности связки от температуры. Параметры, характеризующие объемно-фазовые соотношения в шликере, рассчитывали из соотношений

$$C_v^{kp} = 1 - C_\omega^{cs}, \quad (3)$$

$$C_v = 1 - C_\omega, \quad (4)$$

$$C_\omega^k = 1 - \frac{C_v}{C_v^{kp}}, \quad (5)$$

$$C_{\omega}^{ce} = \frac{C_v}{C_v^{kp}} - C_v = C_{\omega} - C_{\omega}^k. \quad (6)$$

Представленные на рис. 3 зависимости вязкости ($\eta_{\text{пл}}$) от объемной концентрации твердой фазы (C_v) свидетельствуют о различии в структурообразовании шликеров с $C_v = 0,66$ от шликеров с большей концентрацией твердой фазы. На это указывают, в частности, неодинаковое изменение вязкости систем с разным C_v от температуры, поскольку в ином случае, если бы вязкость суспензии зависела только от вязкости связки, можно было бы ожидать одинакового изменения вязкости систем с разным C_v от температуры.

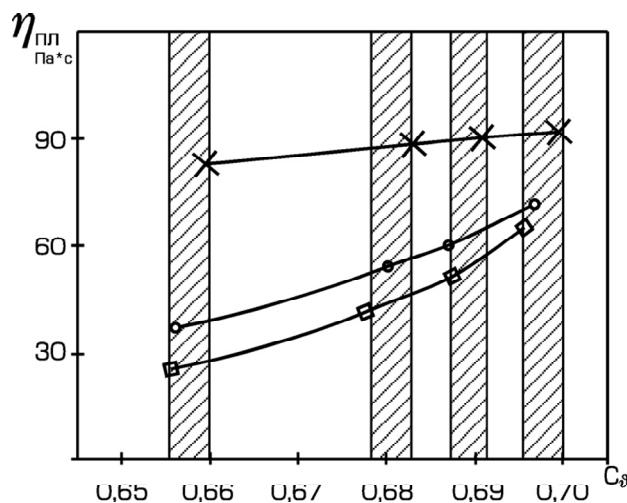


Рис. 3. Зависимость пластической вязкости шликеров от объемного содержания твердой фазы при различных температурах: – 75°C , ● – 66°C , x – 60°C

Анализ объемно-фазовых соотношений в литейных системах с различной концентрацией твердой фазы (табл. 4) показывает, что все шлиkerы характеризуются близким содержанием кинетически связанный связки (около 0,252). В то же время содержание кинетически свободной связки с уменьшением концентрации твердой фазы на 5,4 % увеличивается на 41 %.

Поэтому реологические особенности поведения шлиkerера (рис. 3) при температуре $\sim 60^{\circ}\text{C}$ связаны с определяющим влиянием кристаллизации кинетически свободной связки на свойства литейной системы.

Таблица 4. Параметры структуры шликеров в зависимости от содержания твердой фазы ($T = 75^{\circ}\text{C}$)

% масс связки	C_v	C_v^{kp}	$\frac{C_v}{C_v^{kp}}$	C_{ω}	C_{ω}^{ce}
---------------	-------	------------	------------------------	--------------	-------------------

1	2	3	4	5	6
11,7	0,657	0,723	0,908	0,092	0,251
10,7	0,679	0,728	0,932	0,068	0,253
10,0	0,695	0,734	0,946	0,054	0,251

Таким образом, рассматриваемые высокотеплопроводные литейные шлиkerы на основе оксида бериллия в технологическом диапазоне температур и концентраций твердой фазы имеют реологические свойства, зависящие от соотношения твердой и жидкой фаз. При этом характер изменений структурно-механических свойств в значительной степени определяется соотношением кинетически свободной и связанной связки. Однако варьирование соотношений дисперсной и дисперсионной сред, как и предпринятые ранее попытки варьирования состава дисперсионной среды, не обеспечивает в диапазоне температур структурообразования отливки, приближение реологических свойств таких масс к традиционно технологичным при горячем литье шлиkerам на основе оксида алюминия. В этой связи представляется целесообразным рассмотреть реологическое поведение высокотеплопроводных термопластичных шликеров в условиях энергонасыщенных сред.

Список литературы:

1. Грибовский П.О. Горячее литье керамических изделий. - М.: Госэнергоиздат, 1961. - 400 с.

Получено: 11.09.06.

УДК 669.531.12

А.В. Бреус, А.А. Самойлов
ВКГТУ, г. Усть-Каменогорск

**РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ
ПРОЦЕССА ОБЖИГА ЦИНКОВЫХ КОНЦЕНТРАТОВ В ПЕЧИ КС**

Моделью называется некоторый объект, который используется для воспроизведения и изучения существенных свойств, какого-либо процесса или явления, часто называемого натурным образцом или объектом. Моделью может являться не только материальный, но и мысленный объект. Таковы, например, концептуальные или словесные модели (иногда называемые физическими), которые описывают натурный образец на уровне качественных представлений. К этому же типу относятся и математические модели.

Математическая модель формируется в виде формулы, уравнения или системы урав-

нений, которые могут быть алгебраическими, дифференциальными, интегродифференциальными либо интегральными, но в любом случае она с той или иной степенью приближения и подробности описывает натурный образец, его свойства и поведение.

Уровень математической модели соответствует иерархическому уровню системы или подсистемы, которую она описывает. Например, математическая модель может описывать отдельный процесс, происходящий в образце, либо весь комплекс существенных процессов. Она может описывать взаимодействие различных элементов (объектов) в какой-либо системе.

Цель работы: разработка математической модели процесса обжига цинковых концентратов в печах кипящего слоя; выработка рекомендаций по рациональному ведению процесса.

Процесс обжига цинковых концентратов в печах кипящего слоя характеризуется нестабильностью показаний, обусловленной рядом различных причин, в частности ограниченной областью устойчивости существующих режимов.

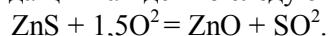
Технологическое оформление процесса обжига, изменение в широком диапазоне свойств поступающего сырья значительно увеличивают трудности управления процессом. На сегодняшний день показатели процесса обжига цинковых концентратов в печах КС далеки от оптимальных.

При разработке математической модели процесса обжига сульфидного цинкового концентрата принимаются следующие упрощающие предположения:

1. Печь КС рассматривается как реактор идеального перемешивания с постоянным объёмом ($V=const$, объём реакционного пространства).

2. Порозность слоя, $\varepsilon = \frac{V_g}{V}$ (где V_g - объем газовой фазы в слое, V - объем реакционного пространства) поддерживается неизменной.

3. Процесс окисления сульфида цинка идет по следующей брутто-реакции:



4. Диффузией кислорода в зерне пренебрегаем.

5. Скорость процесса лимитируется скоростью химической реакции.

6. Константа скорости химической реакции зависит от температуры, эта зависимость реакции описывается законом Аррениуса:

$$K(T) = K_0 \exp \frac{-E}{R \cdot T},$$

где $K(T)$ - константа скорости;

K_0 - предэкспоненциальный множитель;

E - кажущаяся энергия активации;

$R = 1,987$ ккал/град – универсальная газовая постоянная;

T - температура в слое.

7. Реакция имеет первый порядок по концентрации серы (S) и кислорода (O_2) в объеме печи.

8. Продукты обжига выгружаются из печи совместно и содержат некоторое эквивалентное количество серы (C_s - эквивалентное содержание серы в продуктах обжига).

9. Температура огарка равна температуре отходящих из слоя газов и равна температуре слоя (вследствие предположения 1).

10. Влажность дутья пренебрежимо мала.

Таким образом, для скорости химической реакции (W) окисления цинкового концен-

трана имеет место следующее выражение:

$$W = K_0 \exp \frac{-E}{R \cdot T} \cdot C_S \cdot C_{O_2} \cdot M_T,$$

где M_T - масса твердого в печи (кг).

$$M_T = V(1 - \varepsilon) \cdot \rho_{TB},$$

где ρ_{TB} - удельный вес твердого в печи;

K_0 - предэкспоненциальный множитель;

E - кажущаяся энергия активации;

$R = 1,987$ ккал/град - универсальная газовая постоянная;

T - температура в слое;

C_S - процентное содержание серы в шихте;

C_{O_2} - процентное содержание кислорода в шихте.

Нахождение уравнения баланса массы по сере.

Графически данный баланс представлен на рис. 1.



Рис. 1. Баланс по сере

С учетом входных и выходных параметров выводится следующее уравнение:

$$Ms.ш - Ms.ог - Ms.ок - Ms.г = 0,$$

где $Ms.ш$ – весовое содержание серы в поступающей на обжиг шихте;

$Ms.ог$ – весовое содержание серы в огарке;

$Ms.ок$ – весовое содержание серы задействованное в реакции;

$Ms.г$ – весовое содержание серы в газе;

Нахождение уравнения баланса по кислороду

Графически данный баланс представлен на рис. 2.

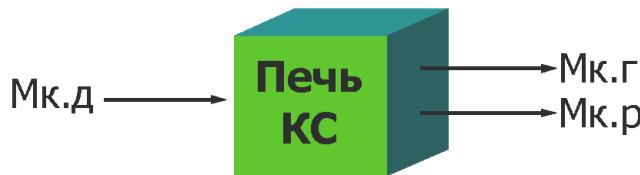


Рис. 2. Баланс по кислороду

С учетом входных и выходных параметров выводится следующее уравнение:

$$Mк.д - Mк.г - Mк.р = 0,$$

где $Mк.д$ – весовое содержание кислорода в дутье;

$Mк.г$ – весовое содержание кислорода в отходящих газах;

Мк.р – весовое содержание кислорода, расходуемое на химическую реакцию окисления.

Нахождение уравнения баланса по кислороду

Графически данный баланс представлен на рис. 3.



Рис. 3. Термический баланс

С учетом входных и выходных параметров выводится следующее уравнение:

$$Q_к + Q_д + Q_{x.р} - Q_{о.Г} - Q_{п} - Q_{о.Х} - Q_{н.К} - Q_{н.Г} - Q_{т.с} = 0,$$

где $Q_к$ – тепло, вносимое концентратом;

$Q_д$ – тепло, вносимое воздухом при дутье;

$Q_{x.р}$ – тепло, выделяющееся в ходе химической реакции;

$Q_{о.Г}$ – тепло, уходящее с огарком;

$Q_{п}$ – теплопотери через стенки печи;

$Q_{о.Х}$ – потери тепла при охлаждении кессонами;

$Q_{н.К}$ – тепло, расходующееся на нагрев концентрата до вступления его в реакцию;

$Q_{н.Г}$ – тепло, расходующееся на нагрев газа;

$Q_{т.с}$ – тепло, расходующееся на теплосодержание.

Таким образом, получено три уравнения баланса: уравнение баланса по сере, уравнение баланса по кислороду и уравнение теплового баланса. Для получения полного математического описания процесса обжига цинковых концентратов объединяем полученные уравнения в замкнутую систему:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{dC_{O_2}}{dt} = M_{\Delta} \cdot C_{O_2} - M_{\Gamma} \cdot C_{O_2, \Gamma} - \alpha \cdot \kappa_0 \cdot \exp\left(\frac{-E}{R \cdot T}\right) \cdot C_S \cdot C_{O_2} \cdot M_T; \\ \frac{dC_S}{dt} = M_K \cdot C_{S,K} - M_{O\Gamma} \cdot C_{S,O\Gamma} - \kappa_0 \cdot \exp\left(\frac{-E}{R \cdot T}\right) \cdot C_S \cdot C_{O_2} \cdot M_T - M_{\Gamma} \cdot C_{S,\Gamma}; \\ \frac{dQ}{dt} = C_K \cdot M_K \cdot t_K + C_{\Delta} \cdot M_{\Delta} \cdot t_{\Delta} + q \cdot \kappa_0 \cdot \exp\left(\frac{-E}{R \cdot T}\right) \cdot C_S \cdot C_{O_2} \times \\ \times M_T - C_K \cdot M_K (T - t_K) - C_{\Delta} \cdot M_{\Delta} (T - t_{\Delta}) - C_K \cdot M_K \cdot T - C_{\Delta} \cdot M_{\Delta} \times \\ \times T - M_K (k_1 \cdot C_{T,O\Gamma} \cdot T + C_{\Delta} (C_{H_2O} (100 - t_K) + \lambda + C_{PAP} (T - 100))) - \\ - Q_n - C_{\Gamma} \cdot M_{\Gamma} \cdot T \cdot \kappa_2 - C_K \cdot M_K \cdot T^0. \end{array} \right.$$

Дальнейшая работа подразумевает реализацию данной математической модели в программах, предназначенных для решения математических задач с применением систем высокого уровня (MathCAD, MatLAB, Mathematica и др.). Эти системы позволяют в формализованном виде строить математические модели физических процессов и явлений. Далее данная модель, выполненная в формате одной из упомянутых математических программ, будет внедрена в алгоритм процесса управления печью КС, реализованного на современном цифровом оборудовании.

Список литературы

1. Максимов Ю.М. Отчет о научно-исследовательской работе «Математическое моделирование металлургических процессов». - М.: Энергия, 1982. - 231 с.
2. Жиров В.Т. Отчет о научно-исследовательской работе «Разработка и испытание распределительных систем автоматического регулирования технологических параметров на базе микропроцессорной техники»/ В.Т. Жиров, А.А. Акылбекова, С.Л. Гребенников/ ВНИИцветмет. - Усть-Каменогорск, 1986. - 100 с.
3. Буровой И.А. Разработка и исследование математической модели процесса обжига цинковых концентратов в печах КС для целей управления температурным режимом/ ВНИИцветмет. - Усть-Каменогорск, 1989. - 51 с.
4. Диамидовский А.А. Автоматизация печей цветной металлургии. - М.: Высшая школа, 1973. - 357с.
5. Диамидовский А.А. Печи цветной металлургии. - М.: Высшая школа, 1976. - 332 с.
6. Арутюнов В.А. Математическое моделирование тепловой работы промышленных печей. - М.: Энергия, 1979. - 245 с.

Получено: 09.08.06.

УДК 543:553.3/.4(574)

Т.В. Денисова, С.И. Ляпунова
ВКГТУ, г. Усть-Каменогорск

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ФОРМ СВИНЦА В СУЛЬФИДНЫХ РУДАХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ЦЕНТРАЛЬНОГО КАЗАХСТАНА

Предприятия свинцово-цинковой подотрасли Казахстана в последние годы все чаще проявляют интерес к изучению вещественного состава природного сырья Атасусских месторождений Центрального Казахстана. В последние годы на предприятия поступают новые виды природного сырья. При этом повышается объем переработки так называемых «труднообогатимых» руд. Их состав характеризуется многокомпонентностью, разнообразием структурных особенностей, полимерными ассоциациями.

При изучении вещественного состава руд и продуктов обогащения полигенного барит-свинцово-цинкового месторождения Жайрем были выявлены разногласия между результатами химического фазового анализа (ХФА) и результатами микроскопического исследования. Результаты химического фазового анализа по установлению степени окисленности руды по сравнению с предварительными результатами её микроскопического изучения были систематически завышены.

Это обстоятельство позволило предположить повышенную растворимость некото-

рых разновидностей галенита в специфических растворителях, используемых в химическом фазовом анализе для определения содержания кислородсодержащих соединений свинца. Поэтому возникла насущная необходимость количественного определения свинца галенита, тонкоассоциируемого с другими некристаллическими сульфидными образованиями – то есть такой формы свинца, которая характеризуется по технологическим показателям, в настоящее время, как «труднообогатимая».

Существенную помощь в решении этой задачи оказывает фазовый анализ, при котором устанавливается взаимосвязь компонентов изучаемого продукта и наличие определенных соединений.

Выбор селективных растворителей и оптимальных условий проведения анализа на формы нахождения элементов производился эмпирическим путем на основании изучения степени растворения минеральных фракций, выделенных из руд исследуемых месторождений.

Материалом для изучения степени растворения разновидностей галенита, церуссита и англезита служили образцы мономинеральных и минеральных фракций, выделенных из руд и продуктов обогащения Жайремского месторождения. Выборка производилась вручную под бинокуляром. Материал был проверен на чистоту микроскопическим, рентгеноструктурным, микрозондовым и химическим методами.

В табл. 1 приведены результаты по изучению степени перехода галенита, церуссита и англезита в растворители, традиционно применяемые в фазовом химическом анализе [1-3].

Таблица 1. Поведение образцов разновидностей галенита под воздействием специфических растворителей XFA

Образец	Со- дер- жание свин- ца, % вес	Перешло в раствор свинца, % (отн.)						
		25% NaCl	15% NH ₄ Ac+ +HAc	0,5% NaOH	2% NaOH+ +аскорбино- вая кислота	40% NH ₄ Ac: H ₂ O ₂ (1:1)	смесь NaLim: H ₂ O ₂	15% NH ₄ Ac: H ₂ O ₂ (9:1)
«Кристаллический» галенит	85,90	0,52	1,25	0,58	0,40	79,60	99,88	99,95
«Каемчатый» галенит	42,78	1,95	4,28	0,95	0,90	99,8	99,50	99,96
«Колломорфный» галенит	25,00	28,60	63,08	12,04	3,43	100	100	100
Англезит	67,83	99,96	98,57	99,64	99,43	99,45	99,98	99,95
Церуссит	76,73	0,53	89,36	99,56	99,34	98,38	99,89	99,94

Из полученных данных следует, что наиболее селективным растворителем окисленных и смешанных соединений свинца для руд Жайремского месторождения является 2 % гидроксид натрия с добавлением аскорбиновой кислоты. Степень растворения свинца всех разновидностей галенита в данном растворителе не превышает 3,5 %, при этом степень перехода в раствор свинца англезита и церуссита составляет 98-100 %.

Полное извлечение сульфидной фазы происходит в смеси 15 % уксусно-кислого аммо-

ния, подкисленного уксусной кислотой, с добавлением пероксида водорода. Данный растворитель практически полностью растворяет как сульфидную, так и окисленную фазу исследуемых минеральных образцов свинца.

Следовательно, свинец галенита можно определить по разности между содержанием свинца, перешедшего в раствор при действии смеси 15 % уксусно-кислого аммония, подкисленного уксусной кислотой, с добавлением пероксида водорода и содержанием свинца, перешедшего в раствор при действии 2 % раствора гидроксида натрия с добавлением аскорбиновой кислоты (рис. 1).

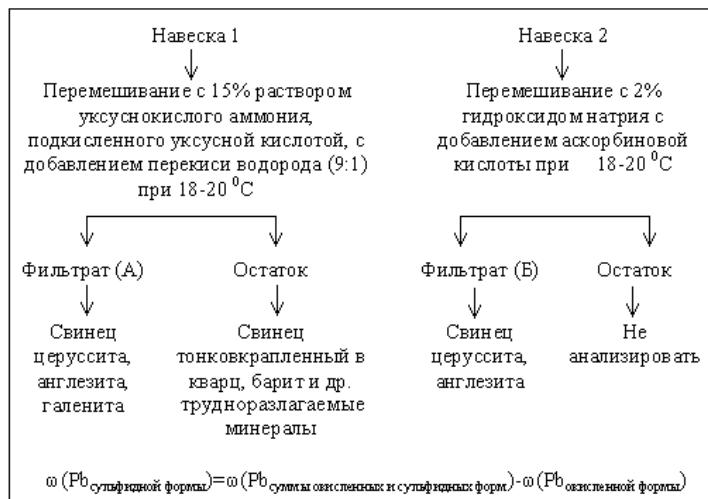


Рис. 1. Схема XФА на соединения свинца в сульфидных рудах Жайремского месторождения
По схеме содержание свинца сульфидных форм (B) определяется, как:

$$B = A - B, \quad (1)$$

где А – массовая доля свинца суммы окисленных и сульфидных форм;

Б – массовая доля свинца суммы окисленных форм.

Несмотря на то, что свинец галенита по предложенной схеме определяется расчетным путем, результаты XФА, полученные по этой методике, хорошо согласуются с минералогическими исследованиями.

Установление метрологических характеристик методики анализа проводилось согласно методическим указаниям о метрологической аттестации методик выполнения измерений содержаний компонентов проб веществ и материалов свинцово-цинковой подотрасли.

Контроль правильности результатов анализа проводился методом искусственных смесей (табл. 2). Добавка в виде химически чистых соединений вводилась на стадии взятия навески руды. Искусственная смесь перемешивалась в чашевом истирателе. Погрешность анализа не превышала допускаемых расхождений аналитического определения элемента (табл. 3).

Таблица 2. Результаты последовательного извлечения свинца минеральных добавок из искусственной смеси отдельными селективными растворителями, %

Добавлено, г	Общее содержание свинца,	Найдено свинца в % масс.	
		Из отдельной навески	Последовательно

	% масс.		2% гидроксид натрия и аскорбиновая кислота		Смесь 15% уксусно-кислого аммония и пероксида водорода		Остаток		Суммарно	
	Теор.	Практ.	Теор.	Практ.	Теор.	Практ.	Теор.	Практ.	Теор.	Практ.
Англезита 0,1 Церуссита 0,1 Галенита 1,20 Плюмбоязозита 0,20 Проба Ж-1 50,0	4,63	4,69	0,57	0,59	4,47	4,52	0,16	0,14	4,63	4,66

Таблица 3. Допускаемые расхождения между результатами анализов при определении свинца

Поддиапазон измеряемых содержаний, %	Допускаемые расхождения между результатами параллельных определений, %	Допускаемые расхождения между результатами анализов, %
0,1-0,2	0,015	0,03
0,3-0,6	0,025	0,05
2,0-4,0	0,070	0,14

Для установления показателей сходимости и воспроизводимости на каждый из двух интервалов содержаний анализировалось 15 проб руд. Получено 15 результатов анализа (каждый из двух параллельных определений).

Допускаемое расхождение d_{cx} между результатами параллельных определений рассчитывали по формуле

$$d_{cx} = Q(p, n) \cdot \sigma_{cx}, \quad (1)$$

где $Q(p, n)$ – численный коэффициент, значение которого зависит от регламентированного числа параллельных определений n и двусторонней доверительной вероятности P .

Допускаемое расхождение d между результатами анализов рассчитывали по формуле

$$d = Q(p, n) \cdot \sigma, \quad (2)$$

где $Q(p, n)$ – численный коэффициент, значение которого зависит от регламентированного числа параллельных определений n и двусторонней доверительной вероятности P .

Как видно из табл. 3, относительное среднее квадратическое отклонение воспроизводимости не превышает 0,14 для исследуемых диапазонов массовых долей.

Оценка правильности результатов анализов (табл. 4) проводилась для двух крайних поддиапазонов измеряемых содержаний методом добавок, так как полностью отсутствуют стандартные образцы фазового состава свинцовых руд.

Таблица 4. Оценка показателя правильности методики определения соединений свинца

	Результаты анализа про-	$(C_{jbd} - \bar{C}_{jbd})^2 \cdot 10^{-6}$	Результаты анализа про-	$(C_{jdl} - \bar{C}_{jdl})^2 \cdot 10^{-6}$	Значение эксперимен-
--	-------------------------	---	-------------------------	---	----------------------

	бы без добавки, $C_{j\text{бд}}$		бы с добавкой, $C_{j\text{д}}$		личины добавки, $\tilde{C}_j = C_{j\text{д}} - C_{j\text{бд}}$
1	2	3	4	5	6
Проба № 4					
1	0,12	9	0,22	16	0,10
2	0,12	9	0,23	36	0,11
3	0,12	9	0,23	36	0,11
4	0,13	169	0,22	16	0,09
5	0,10	289	0,22	16	0,12
6	0,11	49	0,21	196	0,10
7	0,12	9	0,23	36	0,11
8	0,10	289	0,22	16	0,12
9	0,13	169	0,22	16	0,09
10	0,12	9	0,24	256	0,12
Σ	1,17	1010	2,24	640	
Проба № 7					
1	2,38	400	4,68	324	2,30
2	2,37	100	4,70	4	2,33
3	2,35	100	4,70	4	2,35
4	2,34	400	4,69	64	2,35
5	2,36	0	4,70	4	2,34
6	2,36	0	4,72	484	2,36
7	2,35	100	4,70	4	2,35
8	2,35	100	4,69	64	2,34
9	2,35	100	4,69	64	2,34
10	2,39	900	4,71	144	2,32
Σ	23,60	2200	46,98	1160	

Значение добавки выбирали таким образом, чтобы аналитический сигнал определяемого элемента увеличился в 1,3-2 раза по сравнению с аналитическим сигналом этого компонента в отсутствии добавки. Добавка в виде химически чистых соединений вводилась на стадии взятия навески руды.

Результаты показали, что дисперсии данных диапазонов принадлежат одной генеральной совокупности, и математически ожидаемая систематическая составляющая погрешности между величиной введенной и найденной добавки не значима на фоне случайного разброса.

Таким образом, в настоящей работе подробно разобрано поведение отдельных минеральных форм свинца к наиболее часто применяемым и вновь предложенным селективным растворителям. В результате проведенных исследований разработана методика химического фазового анализа на соединения свинца в рудах зоны Жайремского месторождения.

Применение схемы для ХФА сульфидных руд ряда месторождений Центрального региона Казахстана способно дать объективную информацию о степени окисленности подобных объектов.

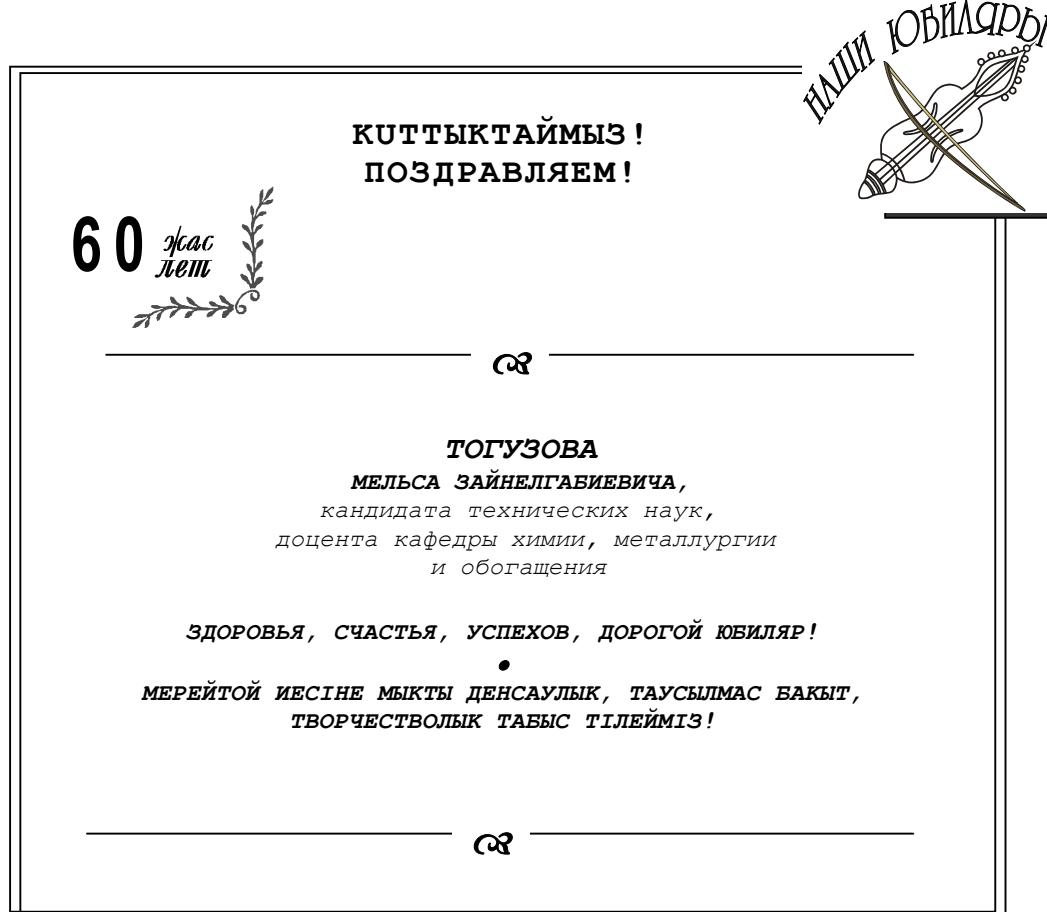
Предложенный вариант ХФА отличается от существующих наибольшей селективностью при разделении сульфидных и окисленных фаз. Кроме того, он заслуживает внимания как наиболее доступный и дешевый метод изучения вещественного состава с использованием избирательных растворителей. Определение форм свинца по данному варианту

сокращает продолжительность процедуры анализа в 2-3 раза.

Список литературы:

1. Филиппова Н.А. О выборе селективных растворителей при химическом фазовом анализе // Зав. лаб. - 1959. - Т. 25. - № 1. - С. 23.
2. Филиппова Н.А. Уточненная методика фазового анализа на соединения свинца, руд и продуктов обогащения / Н.А. Филиппова, В.А. Корюстелена, Чжу Юэ-Ин // Зав. лаб. - 1961. - Т. 27. - № 11. - С. 1346.
3. Оспанов Х.К. и др. Выбор оптимальных условий определения суммы окисленных форм свинца методом математического планирования эксперимента // Аналитическая химия. - 1979. - Т. 34. - № 4. - С. 728-733.

Получено: 19.07.06.



УДК 535

Ж.Ж. Жұмагалиева

Θ.А. Жолдасбеков атындағы механика және машинатану институты, Алматы қ.

ПОЛИКРИСТАЛДАРДЫҢ ПЛАСТИКАЛЫҚ ДЕФОРМАЦИЯСЫНЫҢ МЕХАНИЗМІ

Дайындағаны шөктіру операциясын қолданып өндөумен салыстырғанда оны ұзартуға өндеген кезде осы дайындағаның көлденең қимасы бойынша деформация біршама біркелкі таралады. Осы кезде соққыш пішіні деформацияның таралуына әсерін тигізеді. Әдетте көптеген авторлар өздерінің жұмыстарында деформацияның бұйым қимасы бойынша біркелкі таралмауын бір рет жаншу позициясынан қарастырады, ал соғылманың сапасын шөкпе мөлшерімен байланыстырады [1]. Осы уақытта соғылма қасиетінің деңгейі мен тұрақтылығы ығысу деформациясы дәрежесінің мөлшеріне тәуелді. Соғы кездері соғылма қимасы бойынша ығысу деформациясының пайда болуын қамтамасыз ететін соғу процесінің әдістері мен соққыш пішініне аса көп көңіл бөлініп жатқанын айта кеткен жөн [2]. Бірақ осы уақытқа дейін ұзарту кезіндегі ығысу деформациясының дәрежесі мен ығысу деформациясы мәндерінің соғылма сапасына әсері әдебиеттерде көлтірлімеген.

Сөйтіп, болаттар мен қорытпаларды соғудың технологиялық процесі мәселелерінің бірі болып ығысу деформациясының дәрежесін біркелкі тарату және ығысу деформациясын дамыту арқылы құйылған (дендритті) құрылымды деформацияланған құрылымға айналдыру болып есептеледі.

Металдар мен қорытпалардың пластикалық деформациясының негізгі механизмі болып дислокация қозғалысының көптеген түрлерінің көмегімен жүзеге асатын түйіршіктер ішіндегі кристалдың бір бөлігінің екінші бөлігімен салыстырғанда ығысып жылжуы саналады. Мұндай жағдайда түйіршіктің ішіндегі пластикалық деформация қарастырылады. Пластикалық деформацияның ығысу механизмі әр түрлі. Солардың негізгісі сырғанау, егізделу және тастауқұру болып есептеледі [3].

$T \geq 0,5 T_{\text{бал}}$ (мұнда $T_{\text{бал}}$ – балқу температурасы) температурасында жалпы пластикалық деформацияның 20 % түйіршіктің шекарасы бойымен сырғудың журуімен байланысты болады. Мұнда түйіршік ішіндегі және түйіршік арасындағы пластикалық деформацияны жеңілдететін диффузиялық процестер үлкен рөл атқарады. Вакансиямен жеңілдетілетін жеке кристалдың диффузиялық жылжуы мүмкін. Осы ваканциялардың концентрациясы мен қозғалуы осындай температурада біршама артады [3].

Түйіршіктердің шекарасы мен денесінің беріктігі тең болатын температура – эквигазивті температура, ол шамамен $0,4 T_{\text{бал}}$ температурасына тең болады. $T < 0,4 T_{\text{бал}}$ болған кезде түйіршіктің іші оның денесіне қараганда берік болып келеді, ал $T > 0,4 T_{\text{бал}}$ болған кезде, керісінше, түйіршіктің іші оның денесіне қараганда жұмсақ болып келеді. Шекарадағы атомаралық байланыс күштері (демек, атомаралық қашықтық) түйіршік денесіндегі күштердің мөлшерлеріне сәйкес болу керектігі осыдан шығады. Осыған байланысты түйіршік шекарасындағы пластикалық деформацияның қазіргі заманғы теориясы тәжірибелік мәліметтерге сәйкес келетін осы заманғы түйіршікаралық шекаралар құрылымына негізделіп жасалған [3].

Металдарды және қорытпаларды қысыммен өндеген кезде осы металдар мен

корытпаларда пластикалық деформация бір уақытта бірнеше механизмдер көмегімен жиі жүреді. Айтылған және басқа да механизмдердің нақтылы жүруі көптеген факторлармен, анықталады, яғни кристалдық тордың типі, металдың (корытпаның) химиялық және фазалық құрамы, құрылымы, деформация дәрежесі, жылдамдығы, түрі, деформация температурасы сияқты факторлармен анықталады [2, 3].

Көптеген авторлардың әр түрлі металдар мен қорытпаларда жасаған толып жатқан тәжірибелері нәтижесінде мыналар анықталған: 1) поликристалдардың пластикалық деформациясының кристалдық тор түріне, химиялық және фазалық құрамға, металдың құрылымына, деформация дәрежесі, жылдамдығы мен температурасына және тағы басқа факторларға тәуелді болуы; 2) металдың құрылымына макродәрежедегі ығысу деформациясының едәуір әсер етуі.

Әлбетте жоғарыда көрсетілген жұмыстарда поликристалдардың пластикалық деформациясы механизміне деформацияның әр түрлерінің (созу, қысу, ығысу) әсері талданбаған.

Түрлі зерттеулердің нәтижелерін талдау негізінде сыналатын үлгіге әр түрлі құш түсірген кезде пластикалық деформация механизмі қандай болатындығын салыстырып көрейік. Қысу немесе созу кезіндегі жылжыпсырымалық процесі түрінің үзік-үзік болуы түйіршіктің шекарасы бойынша қозғалыс мынандай екі процестің себебінен іске асырылатынын болжауға негіз береді: бір-біріне жақсы сәйкес келетін аралдар бойынша ығысу және бұзылған үлкен аумактарды реттеу үшін керекті өздігінен диффузия [4].

Поликристалдарда түйіршіктер шекарасы жазық емес, ал ондағы сырғанау кедірбұдыр жазықтықта жүзеге асады [4-5]. Тіпті атом масштабындағы дөңестердің болуы шекаралар бойынша тікелей сырғуға мүмкіндік бермейді. Өйткені дөңестерді кесу үшін үлкен кернеу талап етіледі. Сондықтан түйіршік шекарасы бойынша сырғу пластикалық деформацияның элементарлық актісі болып саналмайды. Өйткені оны іске асыру, нәтижесінде шекара жазық болып кететін аккомодациялық процестің даму мүмкіншілігінен және түйіршік шекарасында кристаллографиялық сырғу жазықтығындағы сырғу сияқты сырғудың журу мүмкіншілігінен тәуелді болады.

Өз кезегінде аккомодация процесі мыналармен қадағаланады: а) серпімді ығысумен; б) пластикалық қасиеттің диффузионды механизмімен; в) түйіршік ішіндегі дислокациялық жылжумен [2-6].

Кернеу кішкентай, температура төмен болған кезде сырғанаудың тек серпімді аккомодациясы байкалды. Осы сырғанаудың серпімді аккомодациясы ішкі кернеу сыртқы кернеуге тенеспейінше журе береді. Кернеу кішкентай, температура жоғары болған кезде аккомодация диффузиялы болуы мүмкін. Өйткені шекара дағы кернеулер диффузиялық ағымды тудырады. Нәтижесінде шекара жазық болып кетеді. Кернеу мен температура үлкен болған кезде пластикалық деформацияның нәтижесінде аккомодация жүруі мүмкін, яғни шекараның екі жағындағы дислокацияның қозғалысы сырғу мен өрмелейі арқылы іске асырылады. Осы шекараның бір жағындағы дөңесті алуды, ал екінші жағына ойықты қосуды қамтамасыз етеді [2-4].

Пластикалық аккомодация жағдайында сырғанау жылдамдығы деформациялық сипаттамаға және түйіршіктің құрылымына байланысты болады. Өйткені түйіршіктің ішінде сырғанау металдың беріктенуіне алып келуі мүмкін. Бірінші және екінші аккомодация механизмдерінің әсер ету жағдайын нақты шектеуге мүмкіндік беретін сандық параметрлерді (кернеу, деформация температурасы) априорды түрде көрсету

мүмкін емес. Сонымен қатар нақты жағдайларда аккомодация механизмдері бір уақытта әсер етуі мүмкін. Сондай-ақ аккомодация немесе түйіршік шекарасында сырғанау сияқты процестің қайсысы сырғанау жылдамдығын бақылайтындығы көптеген жағдайларда түсініксіз болып келеді [2-4].

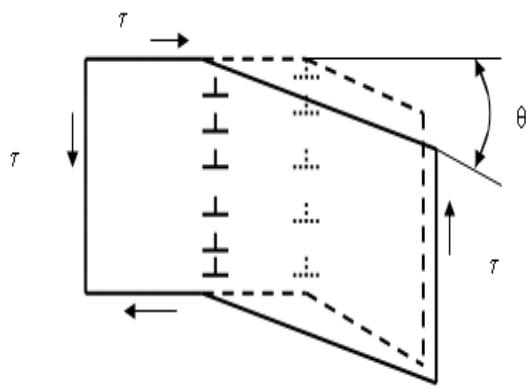
Күрделі шекара үшін шекара бойымен сырғу және миграция тығыз байланысты екендігін Эжби өз жұмыстарында көрсөтті [2-3]. Мұндай жағдайда сырғу мен шекара миграциясы пропорционалды болып келеді. Өйткені сырғу шекара құрылымын өзгертпей жүреді.

Үлкен бұрышты шекара бойынша түйіршік шекарасымен сырғанаган кезде миграция түйіршік шекарасы дислокациялардың қозғалуы арқасында атомдық масштабтағы жазықтықта дейін шекараны үздіксіз икемдеуге алып келетін процесс болып жұмыс атқарады. Бірақ бұл миграцияны пластикалық аккомодация процесінде жүретін миграциядан айыра білу керек. Пластикалық аккомодация процесінде түйіршік шекарасы бойымен тікелей сырғанаумен байланысты емес жергілікті пластикалық деформация болған кездегі миграция байқалады. Осындағы ретсіз миграция түйіршік шекаралық сырғанауға кедегі жасауы мүмкін. Өйткені шекараға сырғу процесінде жазық болуға мүмкіндік бермейді. Түйіршік шекарасының беті бойынша үздіксіз сырғанауды жүзеге асыру үшін түйіршік шекараларында дислокацияның пайда болу көзі әсер етуі керек. Мұндай дислокацияның пайда болу көзі болып түйіршік шекарасына әсер ететін Франк-Рид типті көз болуы мүмкін деген болжамдар бар. Түйіршік шекарасында табылған арқалықтық пайда болулар түйіршік шекарасы дислокациясының көзі болып саналады. Осы дислокациялардың көбеюі өрмелемеумен (сырғанаумен емес) жүреді. Түйіршік шекарасының дислокациялары тор дислокациясының шекараның құрылымдық ақаулармен әсерлесуінің нәтижесінде пайда болуы мүмкін [2-5].

Жоғарыда қарастырылған түйіршік шекараларының сырғанау үлгісі нақты анықталған фактілерге сүйенеді, мысалы, дислокациялар мен сатылардың болу фактісі. Әлбетте бұл түйіршік шекаралары сырғанауының жалғыз үлгісі емес. Түйіршік шекаралары сырғанауының басқа үлгілерінде түйіршік шекаралары сырғанауды шекаралық аймактарда дислокациялардың өрмелемеу процестерімен және диффузиялық жылжыпсырғымалылықтың дамуымен байланыстырады [1-7].

Шекарадағы барлық дислокациялардың өз сырғу жазықтығында бір уақытта қозғалуы және диффузиялық орын ауыстырумен, ал тағы да шекараның «тұтқырлық» қасиетімен байланысты дислокациялардың сырғу жазықтығына тік бағытталған жаққа қарай қозғалуы шекараны біртұтас ретінде өзінің бастапқы жағдайына параллель бағытта жылжуына алып келеді [1-8]. $\gamma = 0$ болатын макроскопиялық деформация орын ауыстырудың қорытындысы болып есептеледі (1-сурет). Бірақ бірінші механизм атермиялық жағдайда өтеді, ал екінші механизм тек жоғары температурада жүзеге асады. Мұндайда θ бұрышы өсken сайын межелік кернеу де артады. Егер дислокацияның сырғу жазықтығы мен сырғу бағытына τ кернеу әсер етсе, онда дислокация бірлігіне әсер етіп тұрған күш $\bar{t}\bar{b}$ -ға тең (\bar{b} -Бюргерс векторы). Бұл күш шекараға нормал бойынша θ / \bar{b} бағытталған. Барлық күштерді қоса отырып $\bar{t}\bar{b}$ -ны дислокация жазықтығына көбейте отырып шекараға түсітін P қысымды табуға болады. Осы қысым $P = \tau\theta$ таза сырғумен шекараны жылжытуға тырысады. Шекара қозғалғанда ол бейнелеп өтетін көлем бірлігіне τ кернеуімен жасалған жұмыс тағы да $\tau\theta$ -ге тең болады. Шекаралар

козгалысының бағыты кернеулер белгісі өзгерген кезде өзгеріп отырады. Осы кезде межелік кернеудің шамасы әсер ететін кернеу белгісі өзгерген кезде азаяды. Бұл құбылыс дислокацияның тік жолмен жүруіне қараганда өткен жолмен кері қарай жүруінің жеңіл жүретіндігімен байланысты. Кернеу тұрақты болған кезде шекаралың бұрышы аз болған сайын шекара қозгалысының жылдамдығы жоғары болады.



1-сурет. Бір еркіндік дәрежесі бар түйіршіктің кіші бұрышты шекарасының τ кернеудің әсерінен қозгалуы

Жұмыстарда 1-6] өлшеніп алынған нәтижелердің мәні түйіршік шекарасы бойынша сырғу мөлшері аз болды және ол шамамен толық деформацияның 10 % құрайды деп санауга негіз береді ($\varepsilon_{up} / \varepsilon_{\sum} \approx 0,1$, мұнда ε_{up} - түйіршік шекарасының деформациясы, ε_{\sum} - жалпы деформация). Осы шама бұрылу бұрышынан θ , температурадан, деформация жылдамдығынан, кернеуден, түйіршік мөлшерінен тәуелді болады. Мысалы, берілген температурада кернеудің артуымен және түйіршік шамасының кішіреоімен ығысу мөлшері, демек, $\varepsilon_{up} / \varepsilon_{\sum}$ үлкейіп отырады. Температура артқан кезде диффузиялық процестің арқасында $\varepsilon_{up} / \varepsilon_{\sum}$ қатынасы 0,3-ке дейін өседі. Жалпы деформацияға түйіршікаралық ығысудың қосатын үлесі жалпы деформацияның 33 %-нан артпайтындығын Д.Мак Лин өзінің жұмыстарында теориялық дәлелдеді. Түйіршік шекарасындағы деформацияның үлесі деформациялау процесі шекаралар миграциясымен қошталған кезде ғана жоғары болуы мүмкін. Жылжыпсырғымағылық кернеуінің артуы бастапқы кезде $\varepsilon_{up} / \varepsilon_{\sum}$ қатынасын өсіруге, ал содан кейін осы мөлшерді азайтуға алып келеді. Осы жоғары температурада шекара бойынша түйіршікті салыстырмалы ығысуға әкелетін жоқ дегенде екі механизм бар екендігін дәлелдейді.

Шекаралар бойынша сырғанау мен толық деформация арасында салыстырмалы ығысуға Шекаралар бойынша сырғанау мен толық деформация арасында салыстырмалы ығысуға мүмкіндік беретін бір бөліну беттері жүйесі (сырғу жазықтықтары) және басқа қасиеттері

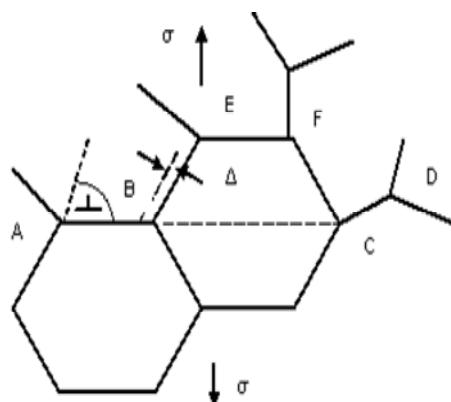
бар осындай жазыктықтардың басқа да жүйелері (түйіршік шекаралары) берілсе, онда металдың тұтастығын, сондай-ақ кернеу мен деформацияның үздіксіз болуын сақтау үшін аталған ығысулар арасындағы қатынас белгілі және тұрақты (ығысу мен жалпы деформация $\varepsilon_{\text{up}} / \sum$ координатасында сыйықтық тәуелділік) болуы тиіс. Сондықтан

поликристалдағы түйіршіктердің сырғанауы мен деформациясы бір-бірімен байланысты. Сырғу деформациясын тоқтататын процестер түйіршік шекарасы бойынша сырғанауды баяулататындығын Д. Мак Лин өзінің жұмыстарында дәлелдеді. Түйіршік ішіндегі деформация мөлшері көп болатындықтан түйіршік ішіндегі ығысу процесс ретінде барлық деформацияны қадағалайтындығы табылған. Алдында болған деформациядан түйіршік көп беріктенген сайын түйіршіктің салыстырмалы жылжуы кіші болатындығын тәжірибелер көрсеткен. Егер түйіршік деформациясы және олардың салыстырмалы жылжуы тәуелсіз процестер болса, онда түйіршіктердің алдын ала беріктенуінен кейін шекаралар есебінен табылатын деформацияның салыстырмалы үлесі жоғарылауы керек еді. Дегенмен $\varepsilon_{\text{up}} / \sum$ қатынасы алдын ала болған деформацияның дәрежесінен тәуелді

болмайды. Осы түйіршікаралық сырғанау түйіршіктің ішімен жүретін деформацияның нәтижесі деп санауға негіз береді (керісінше емес).

Әр түрлі құрылымдық және температура-жылдамдықтық деформация жағдайларында түйіршік шекаралық сырғанау механизмі әр түрлі болатындығы әбден мүмкін. Түйіршік шекаралық сырғанау, оның қандай да болсын нақты микромеханизміне қарамай, пластикалық деформацияның қарапайым процесі болып табылмайтындығын айтып, оған ерекше көңіл аудару манызды болып саналады. Әйткені осы түйіршік шекаралық сырғанау пластикалық аккомодация, шекара миграциясымен келісілтіп дислокацияның өрмелеуі мен қозгалуы жолымен жүзеге асатын түйіршік шекарасы бойынша сырғанау, диффузиялық жылжыпсырғымалилық сияқты кейбір элементарлы процестерді қыстыру әсерінің нәтижесі ретінде жүреді [1-8]. Осыдан түйіршікаралық деформация механизмі тіпті жеке жағдайда жүрмейтіндігі шығады.

Поликристалдағы жеке түйіршіктер деформациясы үздіксіз және бір-бірімен байланысты болады деген түсініктен деформация кезінде түйіршік шекарасының сырғанауымен бірге деформацияның басқа да механизмдері әсер етеді деген ой тудырады [1-8]. Түсірілген кернеулер түйіршік шекарасының AB бойымен Δ ара қашықтығында сырғанауды пайда болғызатындығын болжайық (2-сурет). Сырғанау B нүктесінде кернеулердің шоғырлануын тудыра отырып түйіршік шекарасының деформациясына (ε_{up}) өз үлесін қосады. Осы кернеуді релаксациялау үшін көрші түйіршікте BC бойымен пластикалық ағудын (ε_3) дамуы қажет. Бұл - дислокация B нүктесіне жетіп көрші түйіршікте C нүктесіне, ал содан соң CD бойымен бағытталған сырғуды тудыру керек екендігін нақты білдіреді. Егер дислокация сырғумен бірге өрмелейтін болса ғана осындай қозғалыс пайда бола алады. Әйткені BC мен CD міндетті түрде параллель емес.



2-сурет. Түйіршік шекаралық сырғанаумен бірге ішкі түйіршіктік сырғудың пластикалық деформациясының сұлбасы

Түйіршік шекарасының деформациясымен (ε_{up}) аккомодациялық сырғудың арасындағы байланысты (орын ауыстыру бірлігімен) былай анықтауға болады [1]:

$$\varepsilon_{up} = 0,5S_v q,$$

мұндағы S_v - сырғуға қатысуға үлесін қосатын түйіршік шекарасының беті.

Онда деформацияның жылдамдығы мынандай формуламен анықталады:

$$\dot{\varepsilon}_{up} = 0,5S_v \dot{q},$$

мұндағы \dot{q} - ішкі түйіршіктік сырғудың жылдамдығы.

Сырғуға қатысуға үлесін қосатын түйіршік шекарасының беті $S_v = 2\sqrt{\pi/d}$ (мұндағы d - түйіршік өлшемі) болғандықтан, деформация жылдамдығы: $\dot{\varepsilon}_{up} = \dot{q}\sqrt{\pi/d}$ болады.

Мұндай жағдайда шекараның бұзылмауын болдырмау және оны біріктіруді қамтамасыз ету үшін атомдардың диффузиялық қозғалысы немесе дислокацияның диффузиялық сырғанайтын қозғалысы талап етіледі. Д. Мак Лин аккомодациялық қозғалыс күш әсер ететін бағытта пластикалық деформацияны тудыратынын көрсетті [4]. Мұндай жағдайлар орындалған кезде түйіршік өлшемінен тәуелді болатын жоғары жылдамдығы бар сараптамалық шекізде деформацияны күтүге болады. Деформацияға түйіршік шекаралық сырғанау тек жеткілікті жоғары температурада ғана едәуір үлес кіргізетінін айта кету керек. Әдетте мұндай температурада деформацияның диффузиялық механизмдері әсер етуі мүмкін.

Егер поликристалға мөлшері бойынша үлкейетін тартатын кернеу σ әсер ететін болса, онда пластикалық деформация алдымен ең қолайлы (жақсы) бағытталған түйіршіктеге жүреді, яғни ең үлкен келтірілген жанама кернеуі бар кристалдардағы сырғу жүйесінің біреуі бойынша [1]. Қалған түйіршіктерде деформация серпімділік шегінен шықпайды. Деформацияның біркелкі таралмауы пайда болады. Өйткені кейбір түйіршіктер тек серпімді деформацияланады, ал басқаларында мөлшері $\varepsilon_m = 10^{-4} - 10^{-5}$ жететін жергілікті микродеформация байқалады.

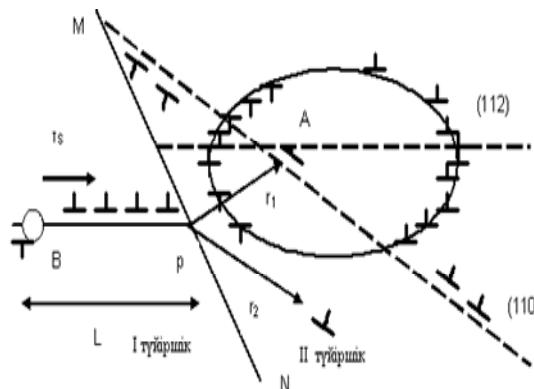
Монокристалдың межелік кернеуімен салыстырсақ, поликристалдар түйіршіктерінің шекарасы жеңіл сырғуға кедергі жасай отырып, поликристалдың σ_m (σ_m - әрбір түйіршікте пластикалық деформация басталу үшін жеткілікті кернеу) микроскопиялық

серпімділік шегін жоғарылатады. Осы кезде деформациядан пайда болатын беріктік коэффициенті артады [1]. Кернеу σ_m -нің мөлшерінен кіші кернеулер пайда болған кезде пластикалық деформация процесіне жекелеген түйіршіктерді тұрақты тарта отырып жүргетін жергілікті пластикалық микродеформация байқалады.

Мөлшері бойынша $\varepsilon > \varepsilon_m$ деформациясы пайда болған кезде түйіршік шекарасы бойынша жалғасу сақталады [1]. Көрші кристаллиттер өзара өсерлескен кезде деформацияланатындығы осыдан шығады. Мұндайда микроскопиялық тұтастық шарты қанағаттандырылуы тиіс.

Металдың үздіксіз болуының бірінші шарты болып (яғни микроскопиялық тұтастықтың бірінші шарты болып) сыртқы күштің өсерінен дислокацияның саты құру жолымен кристаллиттен шығуы мүмкін еместігі саналады (егер төменгі температура туралы айтылса). Өйткені оған көрші түйіршіктер кедергі жасайды. Дислокациялар тек түйіршік шекарасына жақындауы мүмкін. Сөйтіп, дислокациялар I түйіршіктің белсенді көзі B-дан (3-сурет) сырғуға қолайлы бағытталған II түйіршік шекарасына жақындаиды. Осыдан соң түсірілген кернеуге қарсы әрекет жасайтын кернеулерді тудырып, яғни I түйіршіктің ішінде және көрші түйіршіктерде кернеулерді тудырып, шекара да тоқтайды. Осының бәрі металды тиімді беріктендіруге алып келеді.

Түсірілген кернеу өсken сайын көптеген дислокациялар P шекарасына жетеді. Осы дислокациялардың тудырған жергілікті кернеулері өседі және көрші түйіршіктегі дислокацияның A көзін әрекетке келтіру үшін жеткілікті болады (3 – суреттегі II түйіршікті қаранды). Бірінші болып кристалл I – дің дислокациялар тобы тұрган жерге жуық түрде дислокацияларын шекараға шығаратын көздер әрекетке келеді.



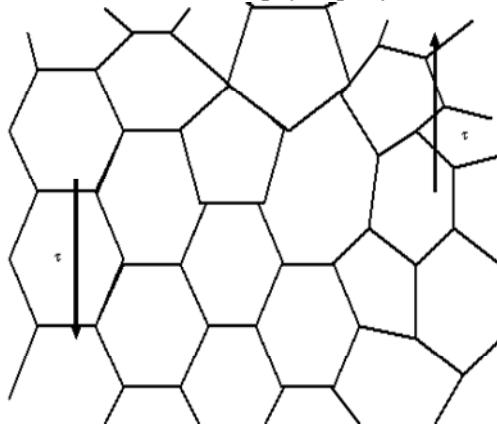
3-сурет. Поликристалдың P дислокациясының жазық қоршауының шынынан r_1 қашықтығына алшактаған көрші түйіршіктің кейір А нүктесінде сырғудың басталуын көрсететін сұлба

Демек, дислокациялар бір түйіршіктен екіншісіне тікелей өте алмайды. Сондықтан сырғудың бір түйіршіктен екіншісіне таралуы I түйіршіктің сырғу жолағының шынында шоғырланған кернеудің өсерінен көрші II түйіршіктегі дислокациялар көзін қоздыру арқылы жүзеге асырылады (3-сурет). Мұндай кернеуге жеткен кезде сырғу шекараны өтеді, ал дислокацияның маңайында бұрыннан жиналыш қалған кернеу өрісі әлсізденеді (кернеудің релаксациясы), ары қарай пластикалық деформацияның жүру жағдайы жасалады. 3-суретте көрсетілген дислокация қозғалысының сұлбасы үшін түйіршіктер шекарасы өздігіне тән бөгеу болып табылады. Сондықтан мұндай жағдайда түйіршіктер шекарасының бөгеулік өсерлесуі немесе бөгеулік беріктенуі туралы айтылады.

Үздіксіздіктің екінші шарты, яғни макроскопиялық тұтастықтың екінші шарты болып деформациядан кейін көрші кристаллиттер шекаралың тұтастығын бұзбай жанасу керектігі есептеледі. Мизес шарты бойынша поликристалдың жеке түйіршіктегі шекарада пішіні бойынша бір-біріне сәйкес келу үшін кристаллитте сырғудың 5 жүйесіне дейін әрекет етуі керек. Поликристалдарда байқалатын көптеген сырғулар металды едәуір беріктендіруге әкеледі.

Егер кристаллиттерде аралық жарықшалар болмаса, онда поликристалдағы әрбір кристаллит өздерінің әрбір шекарасындағы деформацияны шектес кристаллиттің деформациясымен сәйкестендіре отырып деформацияланады. Сондықтан сырттан түскен күшке қатысты түйіршіктегі жазықтықтардың әр түрлі болу себебінен жергілікті деформация түйіршіктеге және әрбір түйіршіктің ішінде өзгеріп отыруы қажет.

Сонымен, ғылыми жұмыстарда [8] алынған нәтижелерді талдау негізінде мынандай қорытындыға келуге болады: 1) металда ішкі түйіршіктік және түйіршікаралық деформацияны дамыту үшін сырғуды дамыттын соққыштың жаңа құрылымын ұсыну керек; 2) осы ұсынылатын соққышта соғылманы соққан кезде деформация ошағында деформация қарапайым сырғумен жүзеге асуы керек; 3) соғу процесінде деформация ошағы шегінде тек жанама кернеу, яғни түйіршіктегі ішінде және оның шекарасында пластикалық деформацияга алып келетін сырғу кернеуі τ пайда болуы керек (4-сурет).



4-сурет. Арнайы соққышта металды соққан кезде деформация ошағындағы түйіршікаралық және ішкі түйіршіктік деформация

Сыртқы күш түсірудің осындай сұлбасында түйіршікаралық және ішкі түйіршіктік деформация женіл жүреді. Сонда пластикалық деформацияға төмендегі себептермен көптеген сырғу жүйелері қатыстырылады: 1) арнайы соққышты қолданып соғылманы соққан кезде түйіршік бетіне қатынасты жанама кернеудің өзгеруіне байланысты түйіршік шекарасының барлық дислокациялары өздерінің сырғу жазықтықтарында бір уақытта қозғалысқа түседі. Осындай бір уақытта қозғалысқа тұсу түйіршіктердің бірлесіп әсерлесуіне және көрші кристаллиттердің деформациясына алып келеді. Осының бәрі деформациялау процесінде металдың тұтастығын сақтауға көмектеседі; 2) арнайы соққышта соққан кезде түйіршік шекаралық деформация процесінде шекараға жақын орналасқан дислокациялар өздерінің орны мен кернеу мөлшерін өзгертуіне байланысты көрші түйіршіктің әр түрлі орындарында дислокация қозғалысын тудыратын көздерді пайда болғызады. Сондықтан жазық соққышта деформацияланған поликристалдармен

салыстырғанда қарапайым сырғуды тудыратын арнайы аспапта деформацияланған поликристалдар белсенді түрде беріктенеді. Белсенді түрде беріктендіру деформацияланған металда беріксіздендіру процестерін тез өткізуге мүмкіндік береді.

Демек, жоғарыда қарастырылған тәжірибелік сараптамадан алынған жағдайлар макросырғумен деформациялаған дайындаған кимасы бойынша түйіршіктердің ұсақтаулы жеткілікті үлкен ықтималдықпен тым ерте жүретіндігінін айқын көрсетеді.

Әдебиеттер

1. Полухин П.И. Физические основы пластической деформации / П.И. Полухин, С.С. Горелик, В.К. Воронцов. - М.: Металлургия, 1982. - 584 с.
2. Горелик С.С. Рекристаллизация металлов и сплавов. - М.: Металлургия, 1978. - 567с.
3. Котрелл А.Х. Дислокации и пластическое течение в кристаллах. - М.: Металлургиздат, 1958. - 267 с.
4. Мак Лин Д. Механические свойства металлов. - М.: 1965. - 431 с.
5. Хирт Дж., Лоте И. Теория дислокаций. - М.: Атомиздат, 1972. - 599с.
6. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов. - М.: Мир, 1972. - 408с.
7. Шьюмен П. Диффузия в твердых телах. - М.: Металлургия, 1966. - 195 с.
8. Машеков С.А. Исследование влияния линейного растяжения, простого сдвига, температуры, времени выдержки на структуру титановых сплавов // Международная научно-техническая конференция «Актуальные проблемы машиностроения и металлургии» /С.А. Машеков, А.М. Секербек, Б.Н. Абсадыков. - Алматы: КазНТУ, 2002.

Получено: 27.07.06.

УДК 622.272

Е.Р. Игнатьев

ВКГТУ, г. Усть-Каменогорск

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКАЯ ПРОВЕРКА СПОСОБОВ ОБРАЗОВАНИЯ ВРУБОВЫХ ПОЛОСТЕЙ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ ГОРНЫХ ВЫРАБОТОК

Процесс развития врубовой полости при проведении горизонтальных и наклонных выработок зависит от принятой конструкции вруба и напряженно-деформированного состояния массива горных пород. Развитие врубовой полости с первоначальным объемом H аналитически может быть обосновано по исходным данным работы [1]. Математическое и графоаналитическое описание проведем в рамках следующей схематизации (рис. 1) при имеющихся на бесконечности ортогональных сжимающих напряжениях P и Q ($Q = \lambda_* P$).

Допустим, что напряженное состояние массива вблизи врубовой полости в произвольной точке А формируется в результате суперпозиции трех направлений:

- 1) от заряда взрывных веществ (ВВ) в т.0 (источник +);
- 2) мнимого заряда ВВ в т.0 (сток -), отстоящего от источника + на расстояние $2W$;
- 3) наличия в массиве окружности радиусом $R_r = \frac{H}{2}$, вписанной во врубовую полость.

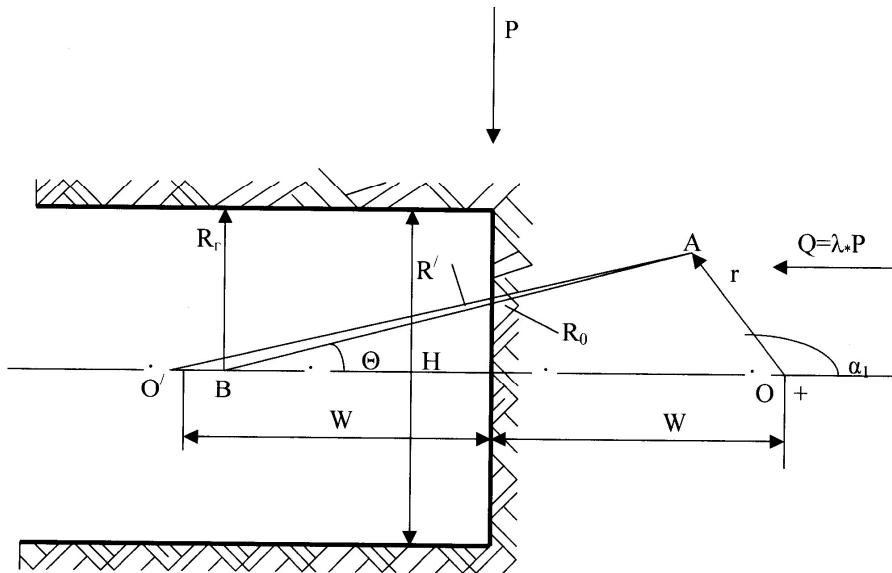


Рис. 1. Схема развития врубовой полости последовательным взрыванием зарядов ВВ

Радиальные σ_r и тангенциальные σ_θ компоненты тензоров напряжений для источника и стока определяются соответственно в виде [2]:

$$\sigma_r^{+,-} = \pm \frac{\sigma_0}{r^n}, \quad \sigma_\theta^{+,-} = \pm \alpha_* \sigma_r^{+,-}, \quad \alpha_* = \frac{\nu}{1-\nu}, \quad (1)$$

где σ_0 – начальное давление продуктов детонации в зарядной полости; $r = \frac{r}{r_0}$ – относительное расстояние; r_0 – радиус заряда ВВ; n – коэффициент затухания; ν – коэффициент Пуассона.

Основываясь на результатах исследований [2, 3] пренебрегаем вкладом поперечной волны в процессе формирования зоны разрушения вблизи свободной поверхности.

Компоненты σ_r^r , σ_θ^r вблизи отверстия радиусом R_f в т. А определяются системой уравнений [5]:

$$\begin{aligned} \sigma_r^r &= \frac{P+Q}{2} \left[1 - \left(\frac{R_e}{R_0} \right)^2 \right] - \frac{P+Q}{2} \left[1 - 4 \left(\frac{R_e}{R_0} \right)^2 + 3 \left(\frac{R_e}{R_0} \right)^4 \right] \cos 2\Theta, \\ \sigma_\theta^r &= \frac{P+Q}{2} \left[1 + \left(\frac{R_e}{R_0} \right)^2 \right] - \frac{P+Q}{2} \left[1 + 3 \left(\frac{R_e}{R_0} \right)^4 \right] \cos 2\Theta. \end{aligned} \quad (3)$$

В результате тензорного сложения (в системе координат r , α , источника +) компонент трех полей напряжений и приведения результирующих компонентов к главным осям, вычисляются главные компоненты σ_1 , σ_2 и осуществляется проверка на выполнение следующих критериев разрушения:

1) отрывом, где $\sigma_{\max} \geq \sigma_p$,

2) сдвигом, где $\frac{(\sigma_1 - \sigma_2)}{2} \geq \tau_{kp}$,

(3)

3) отколом, где $\sigma_r^- \geq \sigma_p$.

Алгоритм решения предусматривал вариацию значений линий наименьшего сопротивления (ЛНС) в диапазоне $W = (0,3 \div 1,2)H$ с шагом $H/10$ с целью определения оптимальной величины W_0 , обеспечивающей максимальный размер зоны разрушения (S_p). Результаты расчетов иллюстрировались графическим построением зон разрушений по каждому критерию (S_p^W). В процессе счета величина P изменялась от 0 до $0,5 \sigma_{cж}$, коэффициент бокового распора

$$\lambda_* = \frac{\nu}{1-\nu} \div 3.$$

Данные работы [1] свидетельствуют о том, что существует влияние исходного НДС на характер формирования зон разрушений отрывом, проявляющееся в диапазоне $\lambda_* \geq 1$, т.е. для состояний, близких к гидростатическому сжатию и действию горного давления в направлении отбойки.

На рис. 2 представлены характерные изолинии напряжений $\bar{\sigma}_{\max} = \sigma_{\max} / \sigma_{cж}$ при взрыве заряда аммонита 6ЖВ ($\sigma_0 = 50\sigma_{cж} = 6000$ МПа) на компенсационную полость, образованную буровой скважиной. Данные рис. 2 свидетельствуют о том, что существенное влияние исходного НДС на характер формирования зон разрушений отрывом проявляется в диапазоне значений $\lambda_* / 1$, т.е. для состояний, близких к гидростатическому сжатию и действию горного давления в направлении отбойки.

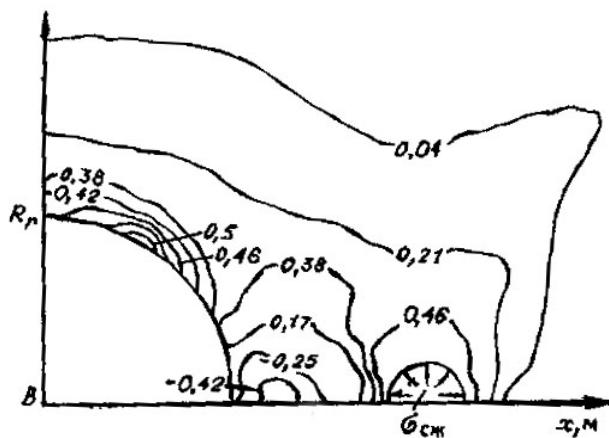


Рис. 2. Изолинии напряжений $\bar{\sigma}_{\max}$ при взрыве на компенсационную полость ($P = -10, Q = -30$ МПа)

По данным работ [1, 4] зависимость изменения суммарной зоны разрушения S_p^{\sum} от значения гидростатического сжатия ($P = Q$) свидетельствует о наличии экстремума функции S_p^{\sum} и двух этапах проявления влияния горного давления на характер взрывного разрушения: до и после достижения величиной P значений, соизмеримых с $0,1 \sigma_{cж} \equiv \sigma_p$.

На первом этапе внешнее поле сжимающих напряжений приводит к резкому уменьшению размеров разрушений по гиперболическому закону. С момента превышения величиной P значения σ_p внешнее поле способствует росту размеров разрушения вблизи врубовой полости по параболическому закону. При достижении $P=0,5\sigma_{ск}$ размеры разрушения составляют 85-90 % размеров, соответствующих условиям отбойки в ненагруженном массиве. Это приводит к запрессовке компенсационных скважин и снижению коэффициента использования шпура (КИШ).

Согласно вышеизложенным положениям была проведена экспериментальная проверка способов образования буровых полостей на Тишинском руднике [4] и при проведении транспортного уклона на Артемьевском руднике. Испытаны следующие конструкции врубов: прямой с компенсационными скважинами, секционной, щелевой и с ограниченной полостью компенсации. Для каждой конструкции проведено 5 серий испытаний в выработках сечением 10,75 м² и 18 м². Сопоставление осуществлялось с проведением выработок в аналогичных по прочности породах (серцит-хлоритовых сланцах и порфириатах).

Число шпуротов и количество зарядов аммонита БЖВ оставались без изменения. Изменилось только их взаимное расположение. Инициирование производилось детонаторами ЭДКЗ-25ПМ с 5-ю сериями замедлений (1-я серия – 4 шт., 3-я серия – 2 шт., 4-я серия – 3 шт., 6 и 7 серии по 6 электродетонаторов). Все конструкции врубов дают КИШ во врубовой полости 0,9...0,95, а по забою в среднем – 0,85...0,87. Удельный расход ВВ во врубовых шпурах минимальный по сравнению со сходными горно-геологическими условиями рудников Республики Казахстан.

Оптимальная глубина шпуров для щелевого вруба находится в пределах $2 \leq l \leq 3$ м (ряд: 2; 2,2; 2,4; 2,6; 2,8; 3 м), для прямого и секционного – $3 \leq l \leq 4$ м (ряд: 3; 3,3; 3,4; 3,6; 3,8; 4 м).

Выполненный эксперимент позволяет сделать вывод, что для сложных горно-геологических условий подтверждаются данными работы [1] о том, что после образования врубовой полости и удаления из неё разрушенной породы дополнительным зарядом ВВ, размещенным в данной части компенсационной скважины, для первого состояния ЛНС составляет $W_0 = 0,7$ м. Формирование суммарной зоны разрушения происходит под действием механизма отрыва (90 – 95 % объема разрушения).

Во втором состоянии $W_0 = 0,6$ м, а механизмы отрыва и сдвига практически в равной степени ответственны за конечный результат взрыва.

В третьем состоянии объемы разрушения возрастают по сравнению с условиями гидростатического сжатия, причем доминирующим механизмом разрушения становится сдвиг (70-80 % объема разрушения), а величина $W_0 = 0,65$ м, т.е. занимает промежуточное значение между оптимальными ЛНС первого и второго состояний.

Вышеизложенные результаты исследований позволяют осуществить обоснованный выбор рациональных схем расположения комплекта шпуротов во врубовой полости с учетом конкретного НДС массива, а также получить результаты не хуже, чем при использовании традиционных компенсационных скважин увеличенного диаметра.

Список литературы

1. Шапиро В.Я. Исследование процессов взрывного разрушения напряженно-деформированных массивов горных пород при проходке выработок / В.Я. Шапиро, О.А. Дьяченко // ФТПРПИ. – 1990. – №5.
2. Таран Э.П. О сферических упругих волнах / Э.П. Таран, А.А. Искаков // ФТПРПИ. –

1990. - №5.

3. Ханукаев А.Н. Физические процессы при отработке горных пород взрывом. - М.: Недра, 1974.
4. Игнатьев Е.Р. Экспериментально-аналитическое обоснование эффективности прямых врубов с ограниченной полостью компенсации / Е.Р. Игнатьев, Г.Д. Лисовский // Современные проблемы геологии, минерагении и комплексного освоения месторождений полезных ископаемых Большого Алтая: Материалы II Международной научно-технической конференции. - Усть-Каменогорск, 2003. - С. 119 - 123.
5. Барон Л.И. Нарушение пород при контурном взрывании /Л.И. Барон, И.А.Турчанинов, А.В. Ключников. - Л.: Наука, Ленинградское отделение, 1975.

Получено: 03.08.06.

УДК 622.271: 658.112

В.Х. Кумыков

ВКГТУ, г. Усть-Каменогорск

С.Т. Капанов

ВК территориальное управление охраны и использования недр, г. Усть-Каменогорск

ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРАВЛЕНИЯ РАЗВИТИЯ ГОРНЫХ РАБОТ В КАРЬЕРЕ С УЧЕТОМ КАЧЕСТВА РУД

Технология открытой разработки сложноструктурных полиметаллических месторождений многосортных руд отличается от подземных горных работ рядом известных преимуществ, в том числе возможностью эффективного управления качеством добычных работ при определенном методическом подходе к проблеме. Технология добычи руд рассматривается нами как многошаговый процесс управления технологической системой «карьер» на каждом временном отрезке t , $t \in T$, характеризующем состояние объекта с заданными параметрами (размеры и форма рабочей зоны, интенсивность развития горных работ, величина подготовленных и готовых к выемке запасов типосортов руды и др.). (T – время работы карьера с максимальной проектной производительностью).

Задача состоит в создании системы управления горными работами, обеспечивающими плановую добычу сортов руды на каждом эксплуатационном горизонте по мере углубки карьера.

Для решения этой задачи предлагается метод пошаговой оптимизации направления развития горных работ в карьере. Данный технологический параметр принят нами в качестве управляющего. Метод базируется на идеях динамического программирования, концепции которого впервые разработаны Р.Беллманом и Р. Калабой [1].

Вычисленный аспект метода в случае его реализации в системе автоматизированного проектирования параметров карьера «САПР-карьер» состоит в следующем.

Допустим, что в пределах j -го горизонта ($j=1, k$) есть сложный рудный забой с суммарными достоверными запасами технологических сортов руд, равными $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k Q_{ij}^D$

($i=1, n$). Согласно утвержденному недельно-суточному графику, это количество можно добывать различными способами. Примем решение добывать руду раздельно по сортам при совместной отбойке на всю высоту рудного уступа h . Тогда Q_i - запасы i -го сорта руды, эффективность выемки которых может быть выражена целевой функцией (функцией полезности или величиной удельной извлекаемой прибыли). Ее величина зависит от количества и качества

добываемого сырья в соответствии с направлением развития и режимом горных работ.

Математическая формулировка задачи: надо отыскать среди всех возможных исходов такую стратегию, которая максимизировала бы значение функции полезности по мере возрастания глубины карьера. Аналитическое выражение задачи в данной постановке имеет вид:

$$\Pi_{oi}^{(K)} \rightarrow \max \{ \Pi_{oi1}(Q_{ij=1}) + \Pi_{oi2}(Q_{ij2}) + \dots + \Pi_{oiK}(Q_{ij=K}) \} \quad (1)$$

при условиях:

- 1) $Q_{ij=1} \geq 0, \dots, Q_{ij=K} \geq 0$ - запасы неотрицательны;
- 2) $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^K Q_{ij} \geq Q_B, i = \overline{1, n}; j = \overline{1, K}$ - суммарные запасы всех сортов руд, извлекаемых с горизонтов, не меньше балансовых в контуре карьера.

Для решения задачи требуется составить рекуррентные формулы, используя основное свойство метода динамического программирования, согласно которому для любого изначального состояния после некоторого этапа решения вся совокупность последующих шагов будет составлять оптимальную стратегию по отношению к состоянию, к которому пришли по результатам исходного этапа решений [2].

На основании свойства аддитивности функции (1), оптимальные исходы поиска траектории углубки карьера для управления технологическим процессом добычи руд по сортам предыдущих шагов суммируются до момента начала нового поиска максимума функции последующих стадий. Поэтому рекуррентная формула стратегии поиска на последующем шаге будет иметь следующую структуру:

$$\begin{aligned} \Pi_{ojj=1}(Q_{ij=1}) &\rightarrow \max \{ \Pi_{ojj=1}(Q_{ij=1}) \}, \\ &0 \leq Q_{ij=1} \leq O_B, \\ &x_{j=1}^{(1)} \leq x_{j=1}^{(0)} \leq x_{j=1}^{(2)}; \\ \Pi_{ojj=K}(Q_{ij=K}) &\rightarrow \max \{ \Pi_{ojj=K}(Q_{ij=K}) + \Pi_{ojj=K-1}(Q_{ij=K}-1) \}, \\ &0 \leq Q_{ij=K}; Q_{ij=K-1} \leq O_B, \\ &x_{j=K}^{(1)} \leq x_{j=K}^{(0)} \leq x_{j=K}^{(2)}; x_{j=K-1}^{(1)} \leq x_{j=K-1}^{(0)} \leq x_{j=K-1}^{(2)}. \end{aligned} \quad (2)$$

Запись (2) означает: экстремум функции (1) достигается при расположении разрезных траншей на j -м и $j-1$ -м горизонтах в области углубки $x_{j=K}^{(1)} \leq x_{j=K}^{(0)} \leq x_{j=K}^{(2)}; x_{j=K-1}^{(1)} \leq x_{j=K-1}^{(0)} \leq x_{j=K-1}^{(2)}$ в границах рабочей зоны карьера в пределах рабочей зоны, если запасы на них неотрицательны, $j \in k$.

Из структуры рекуррентной формулы следует, что для отыскания оптимальной стратегии решения задач многошаговых технологических процессов однородной размерности надо испытать не все варианты, а лишь оптимальные выходы. Это возможно благодаря замене трудоемких вычислений по отысканию экстремума целевой функции по $X^{(j \in k)}$ переменным в исходной задаче оптимизации, в каждой из которых экстремум функции отыскиваем только по переменной. Отсюда следует, что планируя многоходовую стратегию поиска оптимальной траектории углубки с верхнего на нижележащий горизонт, необходимо выбирать управление на каждом из них с учетом возможных выходов на последующих горизонтах по оптимальному положению вскрывающей горной выработки в

области x на j -м и $j-1$ -м горизонтах.

Согласно методу, процедуру поиска оптимального направления углубки карьера начинаем с самого последнего горизонта карьера, для которого не существует последующих шагов, могущих повлиять на выбор управления на последней стадии. Результатом такого методического приема является набор или совокупность оптимальных управлений для данной стадии для любых возможных состояний входа последней, т.е. на временном отрезке работы карьера t , $t \in T$ в области x j -го горизонта.

Задача оптимизации направления развития горных работ решена нами для условий трех карьеров Жайремской группы барит-полиметаллических месторождений с целью организации посортной добычи пяти технологических сортов руд, выделенных по результатам геолого-технологического картирования рудного поля, проведенного с участием ВНИИцветмета.

В качестве целевой функции использовано аналитическое выражение коэффициента полезности вида (3)

$$R^{(k)} = \left[\frac{1+\rho}{1-\eta} \cdot \sum_j^k \frac{V_j}{\gamma_j} + \sum_i^n \sum_j^k \frac{Q_{ij}^{\delta}}{\gamma_{ij}} + \sum_i^n \sum_j^k Q_{ij}^D \cdot \xi \cdot \frac{1-\eta_{ij}}{1+\rho_{ij}} \right] / \Pi_{oi} \quad (3)$$

в области углубки в пределах рабочей зоны карьера $x_{j=1,K}^{(1)} \leq x_{j=1,K}^{(0)} \leq x_{j=1,K}^{(2)}$.

Функция (3) достигает своего максимума при следующих ограничениях

$$1) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k Q_{ij}^D \rightarrow \max \text{ - максимальное извлечение руды соответствует установленной об-}$$

ласти и направлению углубки карьера;

$$2) \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k C_{oj}, C_{pj} \leq \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^k U_{oj} \text{ - затраты на добычу и переработку рудной массы не пре-}$$

восходят суммарной извлекаемой ценности руды.

$$3) A_p(1+K_p) \leq Q_B \left(\frac{1-\eta}{1+\rho} \right) \cdot k_u \text{ - производительность карьера не больше величины из-}$$

влекаемых запасов сырья.

В формулах приняты следующие обозначения:

k_u - коэффициент извлечения, k_p - коэффициент резерва производительности;

ρ - качественные потери руды, обусловленные сложностью контакта руда-порода, руда-руда худшего качества, доли ед.;

η - объемные потери руды i -го технологического сорта, доли ед.;

V_i - объем пустых пород горизонта добычи, m^3 ;

Q_{ij}^{δ} - часть запасов руды, снятых с баланса предприятия в результате их не подтверждения эксплуатационной разведкой, т;

$\tilde{\gamma}_i$ - объемный вес не подтвердившихся запасов руд, t/m^3 ;

Q_{ij}^D - достоверные запасы руды i -го сорта i -го горизонта, т;

ξ - комплексный показатель качества, учитывающий флотационную активность руд и извлечение металла в концентрат, доли ед. ($\xi=0,8$).

Задача решалась в САПР на основе программного комплекса «Поиск», с использованием серии поперечных геологических разрезов и погоризонтных планов.

Достоверность результатов исследований подтверждена принятием к проектированию разработанных рекомендаций для оптимизации систем и параметров второй очереди развития рудника открытых работ Жайремского ГОКа.

Календарный график добычных работ, разработанный с учетом возможных изменений схемы вскрытия, повысил эффективность работы комбината за счет стабилизации качества товарной руды и частичной ликвидации отставания вскрышных работ.

На основании вышеизложенного можно сделать следующие выводы:

1. Предложенный метод и критерий оптимизации позволяют установить положение вскрывающих горных выработок на смежных горизонтах для организации добычи многосортных руд в режиме усреднения качества рудной массы.
2. Эффективность добычи руд можно повысить за счет изменения схемы вскрытия горизонтов в соответствии с направлением развития горных работ.
3. Разработанная методика применима для организации посортной добычи практически на всех рудниках открытых работ, осуществляющих управляемую добычу твердых полезных ископаемых, в том числе при разработке угольных и горючих сланцев месторождений.

Список литературы

1. Беллман Р., Калаба Р. Динамическое программирование и современная теория управления. Пер. с англ. - М.: Наука, 1969. -118 с.
2. Кумыков В.Х. Выбор метода и критерия оптимизации направления развития горных работ в карьерах // Тр. ин-та/ ВНИИцветмет. - Усть-Каменогорск, 1983.- С.68-72.
3. Кумыков В.Х. Совершенствование методики определения развития горных работ // Комплексное использование минерального сырья. - Алма-Ата, 1992.- № 8.- С. 17-21.

Получено: 10.07.06.

УДК 622.271

В.Х. Кумыков

ВКГТУ, г. Усть-Каменогорск

С.Т. Капанов

ВК территориальное управление охраны и использования недр, г. Усть-Каменогорск

ОПТИМИЗАЦИЯ ЗАПАСОВ СОРТОВ РУД, ГОТОВЫХ К ВЫЕМКЕ

Обеспечение рациональных запасов сортов руд в карьерах для раздельной выемки при разработке комплексных полиметаллических месторождений – одна из важных горнотехнических проблем, связанных с решением ряда конкретных технологических задач:

- 1) качественное взрывание рудных уступов;
- 2) формирование геометрии навала рудной массы, максимально благоприятной для организации раздельной добычи сортов руд;
- 3) создание запасов между периодами массовых взрывов, обеспечивающих ритмич-

ную работу горно-транспортного комплекса карьера.

Поставленные задачи решаются совместно на базе:

1) обоснования рядности и порядка рационального расположения буровых скважин на площадке блока при многорядном короткозамедленном взрывании;

2) формирования конструкций зарядов с воздушными промежутками и воздушной подушкой в призабойной части взрывной скважины;

3) бурения комплекта наклонных компенсационных скважин между технологическими скважинами для предварительного разупрочнения массива, сложенного по высоте рудами с различными физико-механическими свойствами;

4) применения порядной схемы взрывания в зажатой среде с формированием второго от бровки уступа врубового ряда с целью получения равномерного рыхления пород по площади за счет управляемого распределения энергии взрыва по всей длине скважины. Последнее мероприятие обеспечивает оптимальную геометрию раз渲ла рудной массы при наименьшем перемешивании сортов руд.

Данные табл., полученные при производстве экспериментальных взрывов на опытных блоках трех карьеров Жайремского ГОКа, свидетельствуют о том, что при применении схем взрывания скважинных зарядов на буфер из отбитой рудной массы, независимо от категорий взрываемости сортов руд, достигается хорошее качество дробления при минимальном перемешивании сортов руд как в плане, так и по разрезу. Это объясняется эффектом направленного сжатия и перетирания кусков при взрывании блоков на буфер. При этом на основании статистического анализа объемов и качества взрывов установлено, что конструкция скважинного заряда, схема инициирования и порядок взрывания рядов при оптимальности сети скважин на блоке являются определяющими факторами при выборе инструмента управления качеством взрывания сложноструктурных рудных блоков в границах рудных уступов.

Результаты экспериментальных взрывов рудных блоков в карьере

Категория взрываемости руд	Параметры сетки скважин, м	Качество рыхления			Качество выемки	
		Выход рудной массы, м ³ /м	Средний размер куска, мм	Содержание негабаритов, %	Потери, %	Примесшивание, %
IV	7,0 x 7,0	35,8	80-100	100-150	3,00	5,00
V	6,5 x 6,5	33,5	150-200		3,25	5,25
VI	6,0 x 6,0	32,7		1 - 2	3,50	5,50

Вторая группа задач, которая ставилась перед нами, это создание запасов взорванной массы в объемах, достаточных для шихтовки технологических сортов, которые гарантировали бы ритмичную работу технологического оборудования в период между массовыми взрывами. То есть, по сути решается задача обеспечения технологической устойчивости системы «карьер», в пределах которой функционирует горно-транспортная подсистема. Данная задача решается с помощью теории управления запасами [1,2]. На ее основе нами разработана методика оптимизации запасов взорванной массы в рабочей зоне меж-

ду массовыми взрывами t , $t \in T$, где T – продолжительность работы карьера с проектной производительностью.

Метод, включающий сбор и обработку статистических данных за устойчивый технологический период, который наиболее полно и достоверно отражает динамику движения запасов в процессе их выбывания и пополнения, разработан для условий карьеров Дальнезападного рудника ЖГОК.

На основе статистического анализа установлен закон распределения фактических запасов горной массы, объемов бурения и количества израсходованного взрывчатого материала за один год.

Объемы подготовки запасов взорванной горной массы варьируются в широких пределах: от минимального своего значения, равного 40 тыс. m^3 на начало 11 месяца, до максимального, равного 350 тыс. m^3 на конец 6 месяца. Производительность экскаваторов типа ЭКГ-5 за указанный период – в пределах 93,9 и 125,7 тыс. m^3 в месяц. Среднемесячные запасы взорванной горной массы, без учета их пополнения последующим взрывом, равны 190 тыс. m^3 . При этом нами установлено, что запасы взорванной массы типов и сортов руд распределены по нормальному закону. Это позволяет представить процесс добычи и складирования рудной массы статической моделью при нестационарном восполнении взорванных запасов. Для моделирования процесса принимаем в качестве целевой функции суммарные затраты на создание запасов ZnT , которая в индексах классической задачи теории запасов имеет вид:

$$ZnT = \sum_{k=1}^n \left[C_k \cdot (\hat{Y}_k - Z_k) + S_T k \cdot (\hat{Y}_k - x_k) \right], \quad (1)$$

для условий:

$$1) \hat{Y}_k \geq x_k,$$

$$2) Z_k \geq x_k,$$

где \hat{Y}_k – запасы взорванной массы, создаваемые на k -й период;

x_k – потребность запасов (спрос) в k -й период;

Z_k – остатки запасов от $k-1$ периода;

$S_T k$ – затраты на создание и хранение избыточных запасов ($\hat{Y}_k - x_k$);

C_k – стоимость обеспечения уровня запасов ($\hat{Y}_k - Z_k$).

Условие (1) означает, что производство сбалансировано, выполнение плана безусловно и поэтому в условиях карьера вторым слагаемым уравнения можно пренебречь (излишние запасы сверх нормативов не нужны) и, кроме того, $x_k \leq Z_k$. Тогда стратегия управления, определяющая оптимальную величину запасов всех сортов, может быть задана уравнением в новых индексах:

$$Z_k = \left[\left(\sum_{\tau}^T C_T V_T + \sum_{\tau=1}^{T-(\tau-1)} C_{\tau-1} \Delta V_{\tau-1} + \sum_{i=1}^n C_{n p, i} t_{n p} \right) + C_{\tau}^D V_{\tau} \right]. \quad (2)$$

Из анализа фактических данных производства в условиях карьеров Жайремского ГО-Ка следует, что остаточная стоимость запасов предыдущего периода минимальна и не оказывает существенного влияния на величину затрат для создания новых запасов руд-

ной массы за время τ , $\tau \in t$, $C_\tau = f(V_\tau)$.

В этом случае на основании функции затрат вида

$$Z_T \xrightarrow{V_\tau} \min \left\{ \left(C_\tau + C_\tau^D \right) \cdot V_\tau + \sum_{i=1}^n C_{np,i} \cdot t_{np} \right\} \quad (3)$$

возможно обеспечение оптимальной стратегии управления запасами сортов руд при сбалансированном производстве (готовых к выемке запасов больше значения сменной производительности забойного экскаватора, количество негабаритных кусков в навале не более 3 %), карьер работает ритмично.

В выражении (3) C_τ^D - стоимость добычи единицы объема V_τ , $C_{np,i}$ - стоимость простоя единицы технологического оборудования; n - количество оборудования; t_{np} - продолжительность простоя карьера, связанная с созданием запасов V_τ .

Выразив C_τ через ее составляющие, получим функцию, минимизирующую затраты на создание запасов взорванной рудной массы за период τ , достаточных и необходимых для шихтовки сортов руд:

$$Z_T \xrightarrow{V_\tau} \left\{ \left(C_{BBP}^\tau + C_{BM}^\tau \cdot q_{BB} \right) \cdot V_\tau + C_{np}^\tau \cdot t_{np} \cdot n_O \cdot \frac{T}{\tau} \right\} \quad (4)$$

При этом ценность добываемой рудной массы должна быть максимальной:

$$U_d \xrightarrow{E \cdot \tau} \left\{ 0,01 \sum_i^n \sum_j^m a_{ij} \cdot Q_{ij} \cdot (1 - \rho) \cdot \varepsilon_{ij} \cdot U_{ij} \right\}, \quad (5)$$

где a_{uo} , Q_{uo} , U_{IJ} - содержание, объем, извлечение и оптовая цена i -го металла j -го технологического сорта в соответствующих единицах.

Таким образом, при условиях:

$$U_d \geq Z_T, \quad (6)$$

$$\sum_{\tau}^T V_\tau \geq \sum_i^n \sum_j^m Q_{ij} \cdot (1 - \rho) \geq A p_{ij} \quad (7)$$

можно гарантировать оптимальность величины объемов подготовки взорванной рудной массы по сортам за период t между массовыми взрывами, достаточными для формирования качественной однородности товарной руды.

Принятые следующие обозначения:

C_{BBP} - затраты на подготовку и взрывание 1 м³ руды, руб.;

C_{BM} - средневзвешенная цена 1 кг взрывчатого материала;

q_{BB} - средневзвешенный удельный расход взрывчатого вещества, кг/м³;

α_{ij} - содержание i -го полезного компонента в j -м технологическом сорте добываемых балансовых руд, доли ед.;

ρ - потери качества руды при добыче, доли ед.;

ε - извлечение i -го полезного компонента из j -го сорта в учетом разубоживания;

$A p_{ij}$ - производительность i -го экскаватора в забое j -го сорта руды, тыс. т руды.

Запасы взорванной рудной массы B_T всех сортов за планируемый период T равны сумме запасов V_τ за τ ; $T = 1, 2, \dots, n, \tau$

$$\sum_1^n \tau = T; B_T = \sum_{\tau}^T V_\tau.$$

Причем по условию $V_\tau \geq A_{ij}$ запасы взорванной рудной массы должны иметь резерв R_e не менее ошибки оценки запасов j -го сорта, величина которой может быть установлена с помощью функции Лапласа вида:

$$P(|x| < 20) = p(-20 < x < 20) = 0,5 [\Phi(2,08) + \Phi(1,25)].$$

Для математического ожидания $\tilde{m}_X = 5$ тыс. т в сторону занижения ошибки запасов с дисперсией $\tilde{\sigma}_X = 12$ тыс. т интеграл вероятности определен численно и равен

$$\Phi(2,08) = 0,9625; \Phi(1,25) = 0,7887; P(|x|) = 0,8756.$$

Месячная производительность четырех экскаваторов ЭКГ-5А по руде с отклонением от среднего не более 1,5 тыс. т в сторону завышения с вероятностью 0,7875 ($\tilde{\sigma} = 1,25$) равна 160 тыс. т. Резерв запасов, равный 20 тыс. т, с вероятностью 0,88 [2, рис. 7.19, а; область 2σ], сглаживает возможные колебания запасов сортов руд, вызванные их неподтверждением на горизонте.

Определим значение C_τ как сумму составляющих

$$C_\tau = Z_\tau + Z_{BM}^\tau + Z_P^\tau, \quad (8)$$

где $Z_\tau, Z_{BM}^\tau, Z_P^\tau$ - стоимости производства массовых взрывов, взрывчатого материала и простоя карьерного оборудования в период между производствами массовых взрывов в единицах целевой функции, соответственно;

C_τ - стоимость создания единицы запасов за τ/T

Составляющие уравнения (8) выразим через их значения за соответствующий период:

$$Z_\tau = C_{BVP} \cdot V_\tau \cdot \tau/T, \quad (9)$$

$$Z_{BM}^\tau = C_{BM} \cdot q_{BB} \cdot V_\tau \cdot \tau/T, \quad (10)$$

$$Z_P^\tau = C_P^\tau \cdot t_{PP} \cdot n_0 \cdot T/\tau. \quad (11)$$

В формулах (8) - (11) значения параметров следующие:

C_{BVP} - затраты на бурение и взрывание 1 м³ горной массы, руб.;

C_{BM} - средневзвешенная стоимость 1 кг взрывчатого материала, руб.;

C_P^τ - стоимость 1 ч простоя технологического оборудования, вызванного подготовкой и взрывом блока, руб.;

C_{BB} - средневзвешенный удельный расход взрывчатых веществ, кг/м³;

t_{PP} - продолжительность простоя оборудования, час;

n_0 - количество технологического оборудования.

Подставив значения (8) - (10) в (4), получим полное выражение функции затрат на создание запасов:

$$Z_T = \{ (C_{BVP}^\tau + C_{BM}^\tau \cdot q_{BB}) \cdot V_\tau \cdot \tau/T + C_P^\tau \cdot t_{PP} \cdot n_0 \cdot T/\tau \} \rightarrow \min. \quad (12)$$

Дифференцирование (11) по τ дает выражение для определения рациональной периодичности взрывания τ_{OP} (1/мес.) для создания запасов сортов руд, готовых к выемке:

$$\tau_{OP} = T \cdot \sqrt{C_P^\tau \cdot t_{PP} \cdot n_0 / (C_{BVP}^\tau + C_{BM}^\tau \cdot q_{BB}) \cdot V_\tau}. \quad (13)$$

Пример для условий карьера № 2 Дальнезападного рудника. Для расчета берем следующие исходные данные: взрывные работы проводятся в течение 1 года, рациональное значение запасов V_τ , обеспечивающее ритмичную работу выемочно-транспортного оборудования между периодами τ производства массовых взрывов - 160 тыс. м³, среднестатистическое значение продолжительности простоев - 1,5 ч. Затраты на производство мас-

совых взрывов в карьерах составили (в ценах 1990 г.): в среднем 1 кг ВМ- 0,351 руб; буровые работы, приведенные к 1 м³ горной массы, - 0,155 руб; взрывные работы (только по затратам ВВ) - 0,179 руб; взрывание 1 м³ горной массы - 0,685 руб.

Периодичность производства массовых взрывов из выражения (11) составит

$$\tau_{OP} = 12 \cdot \sqrt{206,31 \cdot 1,5 / (0,685 + 0,351 \cdot 0,605) \cdot 160\,000} = 0,56 \text{ мес.}$$

Таким образом, для поддержания запасов взорванной рудной массы между периодами взрывов на уровне оптимального значения в течение одного месяца надо произвести не более двух массовых взрывов. При большей частоте, как показывают исследования и опыт производства, затраты на буровзрывные работы, обусловленные простотой технологического оборудования, резко возрастают. При квартальном плане добычи В_т = 412 тыс. т (фактический объем за IV кв.) с содержанием свинца 1,47 %, цинка - 4,89 %, требуемое для шихтовки соотношение запасов сортов руд обеспечивается при периодичности взрывов два раза в месяц.

Список литературы

1. Рыжиков Ю.И. Управление запасами. - М.: ФМЛ, 1969.-344 с.
2. Кумыков В.Х. Статистический анализ запасов взорванной горной массы в карьерах // Комплексное использование минерального сырья. - 1988. - № 7. - С.10-14.
3. Оптимизация технологических процессов на горнообогатительных предприятиях / В.П. Крюков и др. - М.: Недра, 1972. - 112 с.

Получено: 10.07.06.

ДУШ ИЗ ТРЕУГОЛЬНЫХ ДЫРОЧЕК

Ирландский физик Пол Макгиннес из Дублинского университета показал, что для распыления воды на мелкие капельки эффективнее всего не круглые, а треугольные отверстия в головке, через которую вода разбрызгивается. А если стороны треугольника сделать вогнутыми, объем капель уменьшается на 33 % по сравнению с теми, которые вылетают из круглого отверстия.

Открытие пригодится не столько в душе, сколько в компьютерных принтерах: уменьшив размер капельки чернил, вылетающей из печатающей головки, можно получить более четкие изображения.

по страницам

УДК 550.834; 550.832.19



А.К. Троянов

Институт геофизики Уральского отделения РАН, г. Екатеринбург

В.С. Портнов

Карагандинский государственный технический университет, г. Караганда

А.У. Шинтемирова

Северо-Казахстанский государственный университет, г. Петропавловск

СЕЙСМОАКУСТИЧЕСКАЯ ЭМИССИЯ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ИЗЛУЧЕНИЕ ПОРОД
В СВЕРХГЛУБОКИХ СКВАЖИНАХ

Исследования сейсмоакустической эмиссии (САЭ) горных пород в сверхглубоких скважинах позволяют выявить геомеханические процессы, характеризующие современные движения земной коры. Во временных вариациях амплитудного уровня САЭ могут наблюдаться периодичности таких известных деформационных процессов, как штормовые микросейсмы, собственные колебания земли, лунно-солнечные приливы. Учитывая нелинейный отклик геологической среды на воздействие деформационных процессов, а также влияние условий наблюдений, из накопленного опыта исследований, можно утверждать, что регистрация САЭ горных пород на больших глубинах открывает новые возможности в изучении связи между деформационными процессами и акустической реакцией среды, а также при исследовании современной динамики земной коры.

Разработанная в Институте геофизики УрО РАН цифровая аппаратура [1] обладает чувствительностью, позволяющей регистрировать акустический отклик геосреды на деформации порядка $10^{-8} - 10^{-11}$ м. Регистрация САЭ в диапазоне 0,1-5,0 кГц осуществляется тремя ортогонально расположенными датчиками-акселерометрами типа ДН3 (преобразователь пьезоэлектрический виброметрический). В скважинном приборе устанавливаются датчики с коэффициентами преобразования по напряжению не менее $6 - 10 \text{ мкВ} \cdot \text{с}^2/\text{мм}$. Амплитудный уровень САЭ в разных полосах частот представляется в единицах регистрируемого ускорения $\text{мм}/\text{с}^2$. Запись сигналов с трёх направлений стала возможной благодаря слабой поперечной чувствительности датчиков (относительный коэффициент поперечного преобразования не более 4 – 10 %). Поперечная чувствительность датчика-акселерометра определяется его максимальной чувствительностью к колебаниям в направлении, перпендикулярном его главной оси, то есть параллельном поверхности, на которой он установлен. Дополнительным благоприятным фактором для разделения сигналов с трёх направлений является малая амплитуда микровибраций геосреды. Таким образом, в скважине на заданной глубине фиксируются сигналы с трёх направлений, что даёт возможность для их сравнения по амплитуде в разных полосах частот.

Распределение амплитудного уровня САЭ с глубиной происходит по-разному и может испытывать локальные изменения во времени. Амплитудный уровень САЭ зависит от геологических и тектонических особенностей исследуемой среды. Максимальные уровни геоакустических сигналов наблюдаются на участках современных активных микродвижений земной коры и пространственно совпадают с зонами разломов, интервалами дробления и трещиноватости горных пород по разрезу скважин [2].

Из экспериментальных работ на образцах горных пород известно, что с возрастанием всестороннего давления число трещин уменьшается и повышается прочность пород. В реальных условиях верхней части земной коры наблюдаются существенные отклонения от этих закономерностей. Они обусловлены рядом причин, в том числе непрерывными физико-химическими процессами в проницаемых, заполненных флюидами и газами горных массивах. Прочность хрупких пород хорошо аппроксимируется модифицированным условием Кулона-Мора [3]:

$$\sigma_p = \tau_c - f(\sigma_n - P),$$

где τ_c – сцепление пород, f – коэффициент трения при сдвиге, σ_n и P – соответственно нормальное напряжение и давление в жидкости, заполняющей трещину.

Когда f мало, а σ_n и P близки, что выполняется в замкнутых объёмах, то на больших глубинах прочность на сдвиг будет в основном определяться сцеплением пород. Как

показывают лабораторные эксперименты, оно растёт с давлением, так как уменьшаются размеры дефектов и увеличиваются упругие модули. Но при этом следует заметить, что напряжение на разрыв будет расти только в том случае, когда поверхностная энергия не будет эквивалентно уменьшаться. Фактически же, с глубиной, флюиды понижают свободную поверхностную энергию трещин. Кроме того, прочность связей может уменьшаться за счёт эффекта Ребиндера, что учитывается, например, в модифицированной формуле Гриффитса [4]:

$$\sigma_n = \left[\frac{2Gw}{(1-\mu^2)\pi\ell} - \frac{\sigma_p}{2} \right]^{1/2},$$

где w - плотность поверхностной энергии, ℓ - критическая длина трещины, μ - коэффициент Пуассона, σ_p - напряжение растяжения Ребиндера в вершине трещины.

В понижение прочности пород вносят также свой вклад коррозия под напряжением, электрохимические процессы и, наконец, рост температуры с глубиной.

Энергия активации разрывов в горных породах растёт с повышением давления и уменьшается с увеличением температуры. В результате действия этих двух конкурирующих факторов и физико-механических процессов на некоторых глубинах, в зависимости от состава и свойств пород, энергия активации разрывов может достигать минимума, и за счёт термофлуктуационного механизма, сдвиговых квазистационарных напряжений и сравнительно небольших переменных может увеличиваться вероятность возникновения разрывных дефектов. Тем самым, на больших глубинах могут создаваться условия для сохранения проницаемости разломов и образования трещиноватых горизонтов пород, которые будут выделяться аномально высоким амплитудным уровнем САЭ.

В качестве примеров рассмотрим исследования САЭ в Уральской и Кольской сверхглубоких скважинах. Регистрация САЭ пород осуществляется по методике дискретного каротажа при спуске скважинного прибора. Шаг измерений в зависимости от поставленной задачи варьировался в пределах 1-200 м. На рис. 1 показано распределение амплитудного уровня САЭ в скважине Уральской СГ-4 (21.01.2003 г.), выраженного через результатирующую сигналов двух горизонтальных датчиков одинаковой чувствительности. Рассматриваемый интервал (5650-5766 м) вскрытого разреза кубанской свиты сложен лавами андезитов, дацитов и метасоматитов по ним. Эта зона неоднородна, в ее пределах метасоматиты, обычно сланцевые, чередуются с реликтовыми участками менее измененных лав. Аномалии САЭ связаны с интервалами тектонически нарушенных пород, а также контактами пород, отличающихся по коэффициенту Пуассона.

Изучение временных вариаций САЭ в Уральской СГ-4 с целью выявления в них скрытой периодичности собственных колебаний земли проводилось в 1994 г. на глубине 4675 м [5], в 1996 г. и 2003 г. - на глубинах 4905 м и 5774 м, соответственно. Выявленные доминирующие периодичности в спектрах огибающей сигналов САЭ в 1996 г. приведены на рис. 2. Они близки к периодам собственных колебаний Земли, включая и те, которые обычно отождествляются с гравитационными колебаниями ядра Земли (длиннопериодичная часть спектра).

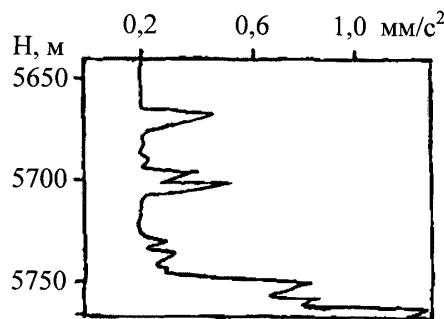


Рис. 1. Распределение уровня САЭ в полосе частот 0,1 – 0,5 кГц в Уральской СГ-4

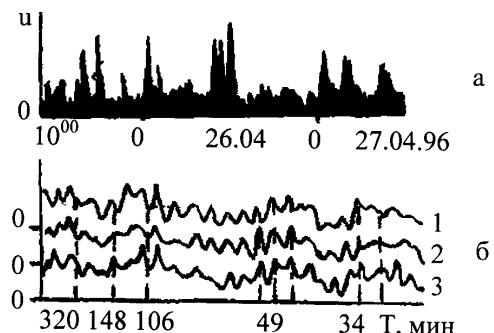


Рис. 2. Режимные измерения САЭ: а – временные вариации огибающих САЭ; б – их спектры (1 – 1994 г., 2 – 1995 г., 3 - 2003 г.)

Раскрытие, закрытие, ветвление трещин сопровождается САЭ, изменяющейся во времени с периодичностью действующих деформационных процессов. В этом плане воздействие штормовых микросейм будет проявляться в вариациях САЭ там, где имеются условия для развития процессов трещинообразования, то есть в ослабленных тектонически нарушенных породах. Подтверждением тому могут служить спектры САЭ пород в Уральской СГ-4 (рис. 3). В трещиноватых породах на глубинах 4890 и 4900 м выделяются периоды штормовых микросейм. В плотных породах (4880 м) сейсмоакустический отклик на воздействие штормовых микросейм отсутствует.

Для оценки влияния лунно-солнечных приливных деформационных процессов на глубокие горизонты земной коры в Уральской СГ-4 в 1997 г. были проведены измерения САЭ в течение месяца на глубине 4885 м. Было установлено, что во время квадратурного прилива амплитудный уровень САЭ с горизонтальных датчиков увеличивается. Кроме того, исследования показывают, что на больших глубинах в земной коре происходят непрерывные деформационные процессы, сопровождающиеся САЭ геосреды.

Исследования в Кольской СГ-3 показали, что вскрытый скважиной геологический разрез представлен породами с отдельными локальными аномалиями их САЭ. Измерениями в декабре 2000 г. был охвачен интервал глубин 0,5-6,0 км, на котором аномальные значения амплитудного уровня САЭ в диапазоне частот 0,1-0,5 кГц достигали 1,0 $\text{мм}/\text{с}^2$ (рис. 4, а). При повторных измерениях (май 2001 г.) в интервале глубин 300-6790 м распределение аномалий САЭ стало другим. Исчезнувшая при повторных измерениях ранее выявленная аномальная зона САЭ пород в интервале глубин 5-6 км (рис. 4, а) и появившиеся две аномальные зоны на глубинах 3 - 3,5 км и 2 - 2,5 км (рис. 4, б) указывают, в первую очередь, на наличие вертикальной миграции напряженного состояния массива пород. Минимальный амплитудный уровень САЭ при первом и повторном измерениях изменился незначительно и составил 0,22 - 0,25 $\text{мм}/\text{с}^2$.

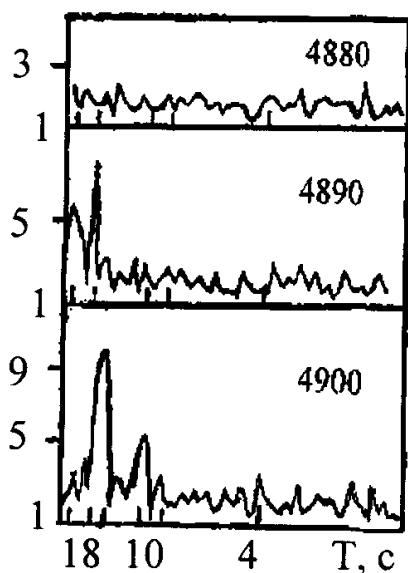


Рис. 3. Спектры огибающей сигналов САЭ в плотных (4880 м) и трещиноватых (4890, 4900 м) породах

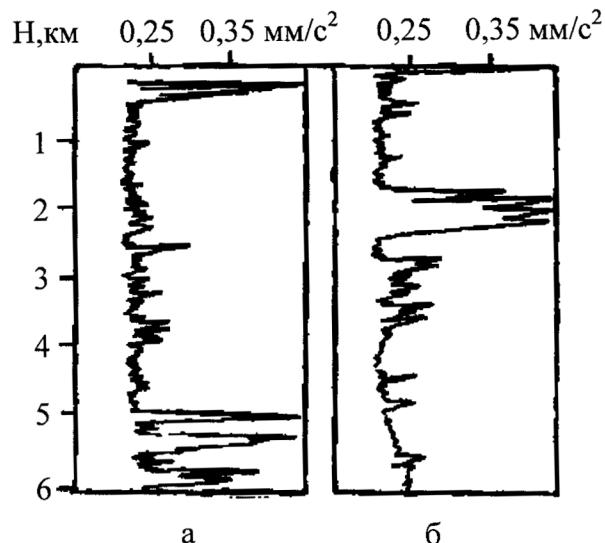


Рис. 4. Сопоставление амплитудных уровней САЭ в Кольской СГ-4: а – измерения в мае 2000 г.; б – измерения в декабре 2001 г.

При изучении временных вариаций САЭ пород в скважине № 497 Ломоносовского железорудного месторождения (Тургайский прогиб) вблизи разлома были включены и измерения электромагнитного излучения (ЭМИ). Регистрация временных вариаций ЭМИ и САЭ в течение 11 суток осуществлялась двухканальной аппаратурой. Во временных вариациях огибающей сигналов ЭМИ в полосе частот 46-88 кГц был отмечен резкий спад амплитудного уровня (рис. 5, а), который повторяется таким же спадом в амплитудных изменениях САЭ (рис. 5, в), как и наблюдавшийся ранее на Среднем Урале в пределах Серовско-Маукского разлома [2]. Данный спад интенсивности ЭМИ и САЭ является отражением современных эндогенных процессов, вызвавшихся в релаксации тектонических напряжений в зоне разлома в виде крипа.

Следует заметить, что спад интенсивности во временных вариациях ЭМИ и САЭ произошёл при переходе от сизигийского прилива к квадратурному, что видно на теоретической кривой приливных приращений силы тяжести, рассчитанной для координат местоположения Ломоносовского месторождения (рис. 5, г).

Проведённые исследования временных вариаций ЭМИ и САЭ показали, что при сравнительно слабых тектонических процессах с относительными деформациями, сравнимыми с приливными, в массивах возникает ЭМИ, и это явление можно использовать для изучения динамики земных недр не только в сейсмически активных, но и в сравнительно стабильных областях.

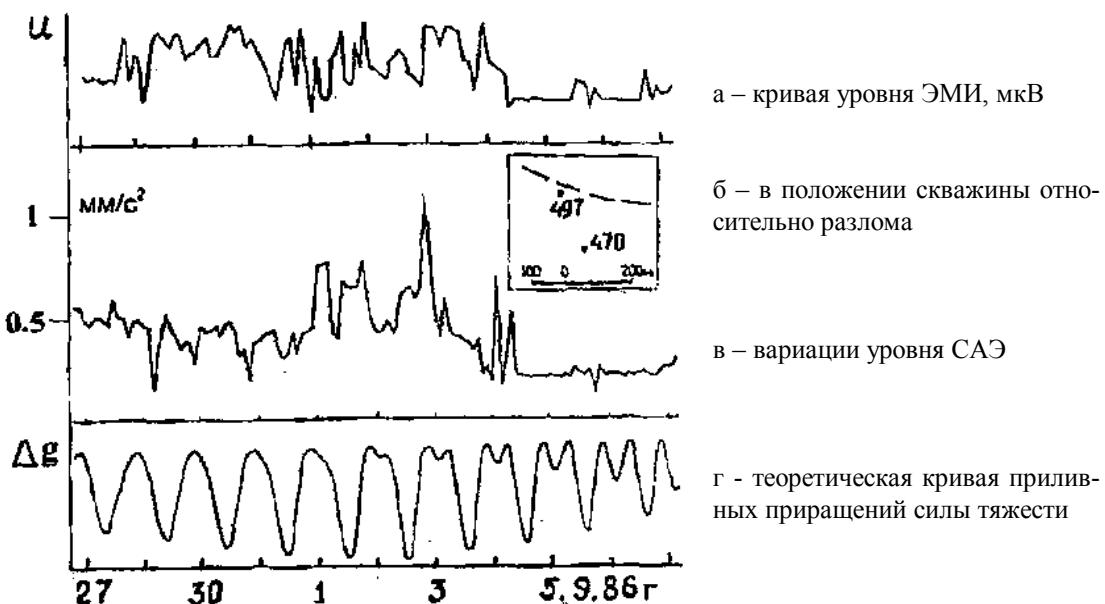


Рис. 5. Временные изменения амплитудного уровня ЭМИ и САЭ

Для оценки на качественном уровне связи ЭМИ с САЭ проведён анализ спектров временных вариаций в скважине 470, удалённой от разлома на 180 м (рис. 5, б). Исходя из предположения, что каждый временной интервал наблюдений может характеризоваться присущим только ему определённым соотношением амплитуд суточных и полусуточных периодичностей, был введён коэффициент Q , показывающий величину этого соотношения. Изменения коэффициентов Q указывают на связь акустического и электромагнитного откликов среды на воздействие лунно-солнечных деформационных процессов.

Учитывая генетическую общность с САЭ, представлялось целесообразным изучить эффективность ЭМИ геологической среды для обнаружения зон тектонической нарушенности пород в скважинах.

В Институте геофизики УрО РАН разработана скважинная аппаратура для измерения ЭМИ в диапазоне частот 46-100 кГц и приема сигналов на трех фиксированных частотах (45; 75 и 110 кГц). Диапазон измерений сигналов ЭМИ - 0,1-10 нТл, максимальная рабочая температура скважинного прибора – 100 °С. Регистрация информации производится на IBM совместимый персональный компьютер через последовательный порт в стандарте интерфейса RS 232.

Измерения ЭМИ осуществлялись при остановке скважинного прибора на заданной глубине. Шаг измерений определялся условиями поставленной задачи.

Созданная методика для изучения ЭМИ геосреды в скважинах в первую очередь направлена на обнаружение трещиноватых пород как возможных источников данного излучения. Действительно, в результате деформационных процессов в земной коре образуются трещины различного масштаба. Раскрытие, закрытие, ветвление трещин сопровождаются возникновением, перемещением и релаксацией электрических зарядов, что, в свою очередь, ведёт к ЭМИ в окружающую геосреду. В условиях неоднородной по структуре и составу геологической среды интенсивность ЭМИ будет выше там, где породы

наиболее трещиноваты [6]. При доминировании мелких трещин, характерных для пород мелкозернистой структуры, наибольшая интенсивность ЭМИ наблюдается на частотах более высоких, чем в крупнозернистых породах, для которых характерны большие по размерам трещины [7].

Проведение повторных измерений в скважинах позволяет определить, как изменился частотный спектр регистрируемых сигналов, и получить информацию о динамике процесса трещинообразования. Для оценки относительных размеров трещин используется отношение сигналов ЭМИ каждой из заданных частот к сигналу наименьшей из выбранных частот. Эти отношения строятся в виде графика и характеризуют преобладание крупных или мелких трещин в массиве пород. Установлено, что в мелкозернистых породах с относительно малыми размерами трещин отношение амплитуд сигналов растет с увеличением частоты регистрируемых сигналов, а в крупнозернистой среде с относительно большой величиной трещин это отношение уменьшается.

В практическом плане определение динамики относительных изменений размеров трещин при неоднократных измерениях в скважинах позволяет контролировать процессы трещинообразования.

Для обнаружения зон трещиноватости, которые не выделяются высоким уровнем сигналов, на заданной глубине в скважине проводится регистрация ЭМИ в течение 2-3 минут, и выполняется гармонический анализ продетектированных сигналов. Зоны трещиноватых пород выделяются аномальным уровнем амплитуд в периоды 4-20 с в спектре продетектированного сигнала. В плотных породах доминирующие периоды в спектрах отсутствуют.

Идея такого подхода к обнаружению динамически активных трещиноватых пород заключается в следующем. Если геологическая среда обладает способностью реагировать на периодичность воздействия деформационных процессов соответствующим изменением ЭМИ, то она является наиболее ослабленной, нарушенной, а следовательно, и подвижной. В этом плане воздействие штормовых микросейсм первого и второго рода с периодичностью 4-10 с и 10-20 с будет проявляться в вариациях огибающей сигналов ЭМИ там, где имеются условия для развития процессов трещинообразования.

В качестве примера выделения трещиноватых пород проведем результаты, полученные в Уральской СГ-4. На рис.6, а приведены фрагменты временных вариаций огибающей сигналов ЭМИ на частоте 110 кГц с указанием их амплитудных значений в нТл. Спектры записей длительностью 3 минуты на глубинах представлены на рис.6, б.

Как видно, в зонах интенсивной трещиноватости пород на спектрах сигналов ЭМИ выделяются (по амплитуде) периоды колебаний 4-20 с. В плотных породах в этих периодах существенных изменений амплитуды не наблюдается.

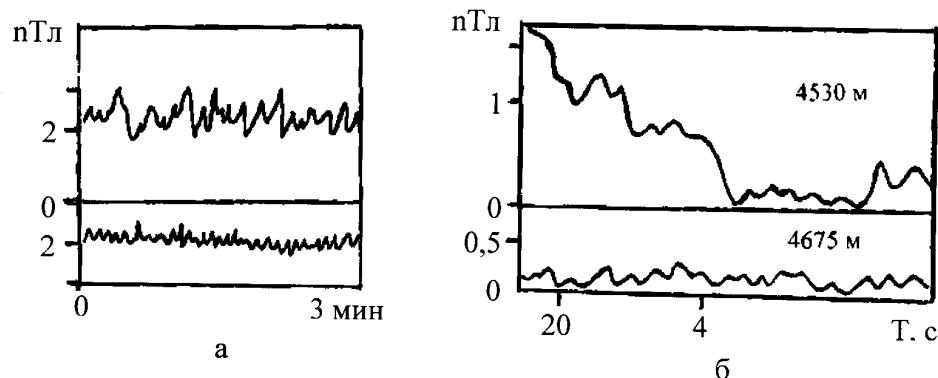


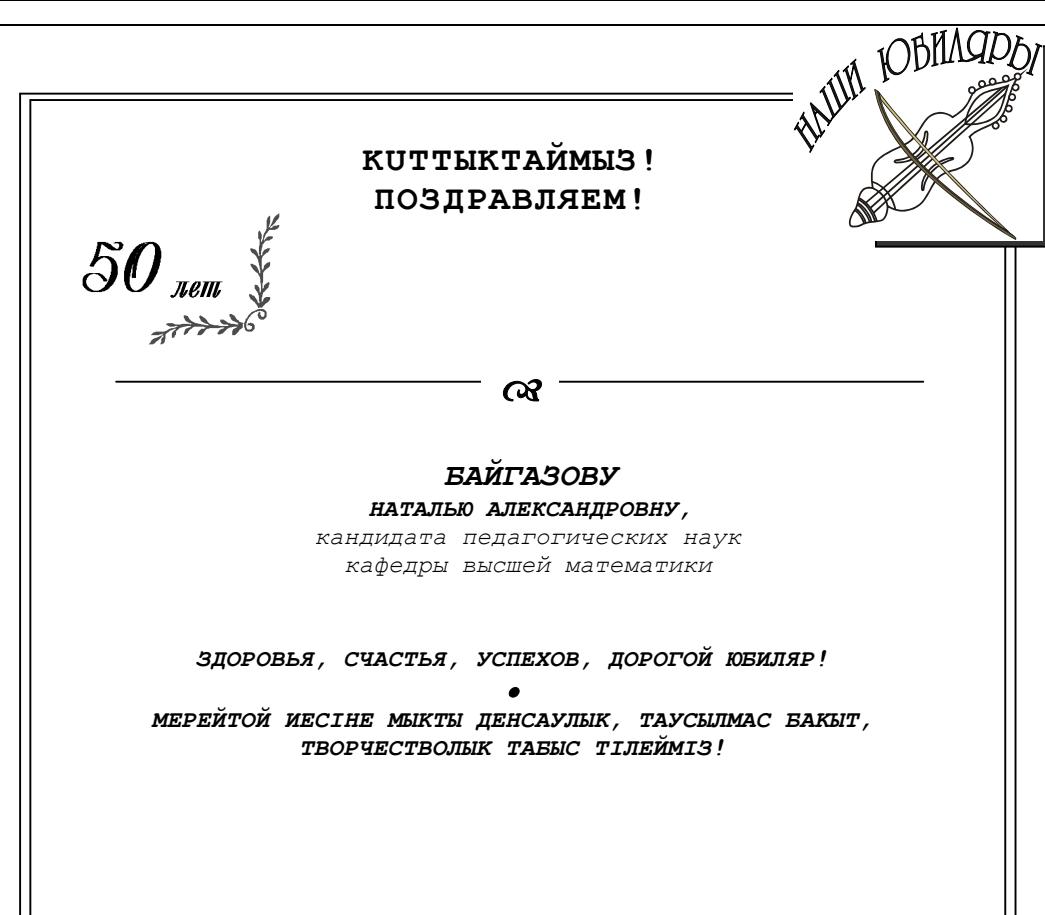
Рис. 6. Фрагменты записи огибающей сигналов ЭМИ (а) и их спектры (б) в трещиноватых (4530 м) и плотных (4675 м) породах Уральской СГ-4

Таким образом, исследования САЭ и ЭМИ пород в глубоких скважинах позволяют оценивать современную динамику геологической среды, в частности тектонически нарушенных пород, и дают информацию о деформационных процессах, вызывающих генерацию электромагнитного излучения в земной коре.

Список литературы

1. Пат. 2123711 РФ, МКИ; G01V1/40. Устройство для измерения геоакустических шумов в скважине / Ю.Г. Астраханцев, А.К. Троянов: Опублик. 20.12.98, Бюл. № 35.
2. А.с. 1236394. Способ скважинной сейсмической разведки / Б.П. Дьяконов, Р.В. Улитин, А.К. Троянов, В.А. Фадеев. - Бюл. № 21. - 07.06.86.
3. Борисов А.А. Механика горных пород и массивов. - М.: Недра, 1980. - 240 с.
4. Бартенев Г.М., Карташев Э.М. Влияние поверхностно-активных сред на пороговое не-разрушающее напряжение полимеров в хрупком состоянии // Докл. АН СССР, 1987. - Т.296. - №4. - С. 28-32.
5. Дьяконов Б.П., Троянов А.К. Проблемы геодинамики и мониторинг геоакустических шумов в Уральской сверхглубокой скважине // Результаты бурения и исследований Уральской сверхглубокой скважины (СГ-4)/Научное бурение в России. - Ярославль: ФГУП НПЦ Недра, 1999. - Вып. 5. - С. 58-66.
6. Дьяконов Б.П., Кусонский О.А., Троянов А.К., Фадеев В.А. Электромагнитное излучение горных пород по разрезу скважины //Современные проблемы ядерной геофизики и геоакустики. - М.: ВНИИ геоинформсистем, 1990. - С.225-230.
7. Пат.2150720 РФ, G01V3/18. Способ определения трещиноватости горных пород в скважинах / Ю.Г. Астраханцев, А.К. Троянов, Б.П. Дьяконов; Опубл. 10.06.2000, Бюл.№ 16.

Получено: 08.08.06.



ISSN

1561-4212.

ВЕСТНИК

55 ВКГТУ,

2006,

№

3

ГЕОЛОГИЯ, ГОРНОЕ ДЕЛО, МЕТАЛЛУРГИЯ

— ♀ —