

УДК 622.273.217.4

**ВЛИЯНИЕ ХИМИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ ТВЕРДОЙ МАССЫ СМЕСЕЙ ПРИ ЗАПОЛНЕНИИ ИСКУССТВЕННЫХ ПОЛОСТЕЙ В ЗЕМНОЙ КОРЕ**<sup>1</sup>*Кузьменко А.М., <sup>1</sup>Петлёваный М.В., <sup>1</sup>Лозинский В.Г.*<sup>1</sup>*НТУ «Днепровская политехника» МОН Украины***ВПЛИВ ХІМІЧНИХ ЕЛЕМЕНТІВ ТВЕРДОЇ МАСИ СУМІШЕЙ ПРИ ЗАПОВНЕННІ ШТУЧНИХ ПОРОЖНИН У ЗЕМНІЙ КОРІ**<sup>1</sup>*Кузьменко О.М., <sup>1</sup>Петльованый М.В., <sup>1</sup>Лозинський В.Г.*<sup>1</sup>*НТУ «Дніпровська політехніка» МОН України***EFFECT OF CHEMICAL ELEMENTS OF SOLID MASS OF MIXTURES AT FILLING TECHNOGENEOUS CAVITIES IN THE EARTH CRUST**<sup>1</sup>*Kuzmenko O.M., <sup>1</sup>Petlovanyi M.V., <sup>2</sup>Lozynskyi V.H.*<sup>1</sup>*Dnipro University of Technology MSE of Ukraine*

**Аннотация.** Приведены результаты исследований влияния химических элементов твердой массы смесей на их прочностные характеристики и новообразования при заполнении искусственных полостей в земной коре. Предложен комплексный методический подход к исследованию, включающий химический и рентгенофазовый анализ минерального состава компонентов закладочной смеси, метод растровой электронной микроскопии, микрорентгеноспектральный анализ, экспериментальные исследования по определению прочности на одноосное сжатие образцов.

Исследован химический и минералогический состав компонентов закладочной смеси методом рентгенофазового анализа и выявлен их характер влияния на структуру цементного камня. Установлено влияние степени раскрытия сростков в компонентах закладочной смеси и удельной поверхности частиц, содержащих цементообразующие химические элементы на структуру новообразований и ее прочность. Дана количественная оценка изменения прочности искусственного камня в интервале удельной поверхности вяжущего материала 2000 – 6600 см<sup>2</sup>/г. Акцентируется внимание на важности перехода гелеобразного состояния новообразований цементного камня к кристаллическому. Изучены аспекты взаимного влияния оксидов CaO, MgO в доменном гранулированном шлаке, флюсовых известняках и отвалных дробленых пород на прочность твердеющей смеси. Показано, что степень измельчения компонентов в твердой фазе закладочной смеси существенно влияет на структуру образования твердой массы и ее прочность, но находится в определенном интервале раскрытия сростков, являющимися носителями химических элементов и их значения в формировании структуры цементного камня. При формировании искусственного массива в горном массиве необходимо учитывать химический состав геологических образований, поскольку этот фактор может существенно влиять на прочностные характеристики восприятия внешних нагрузок. Затворение закладочной смеси растворами солей требует дополнительного изучения с учетом экономической целесообразности и экологической безопасности при охране недр.

**Ключевые слова:** твердеющая смесь, искусственный массив, прочность, удельная поверхность частиц, вмещающие породы, рентгенофазовый анализ, растровая микроскопия.

**Введение.** В земной коре возникает множество полостей, которые образуются в результате инженерной деятельности и представляют опасность обрушения горных пород со временем. В большинстве случаев это относится к подземной разработке месторождений полезных ископаемых, а также при размыве грунтов подземными водами при порыве коммуникаций. Нарушается земная поверхность, образуются провалы, воронки и другие образования, которые доставляют проблемы при ведении хозяйственных работ, нарушают окружающую среду и требуют выполнения охранных мероприятий. Предотвращение подобного рода последствий ведения инженерной деятельности в земной коре предусматривает выполнение работ по заполнению полостей закладочными сме-

сями, состоящих из различных горных пород, отходов переработки промышленности и бытового хозяйства, которые со временем превращаются в твердое состояние под действием различных факторов [1, 2]. Такими факторами могут быть силы гравитации, химические реакции между химическими элементами, внешние силы уплотнения и др. это зависит от функционального назначения искусственного создаваемого массива в момент заполнения полости в горных породах или после приобретения определенных прочностных характеристик. В этих условиях важным является состояние окружающей среды и температурный режим горных пород, и особенно, когда твердение искусственного массива образовывается в результате химической реакции.

При подземной разработке выемка полезных ископаемых ведется различными способами, таким как механическое, взрывное и гидравлическое отделение частицы массива [3-5], а также химическое и термическое преобразование полезных ископаемых по химическим соединениям в виде жидкостей и газов [6-8]. Создаваемые искусственные полости вследствие выемки полезного ископаемого заполняются закладочными смесями в том случае, когда необходимо полностью забрать полезное ископаемое из-за его ценности, а земную поверхность необходимо сохранить от деформации. В другом случае, когда сложные условия разработки при образовании большого объема полостей в горном массиве и последующая выемка осложнена из-за угрозы обрушения полезного ископаемого и его утери или горных пород, которые приведут к потере его природного качества. Создание полноценного прочного искусственного массива, максимально приближенного к природным прочностным свойствам окружающих полость горных пород, возможно при помощи внутреннего химического превращения закладочных смесей [9, 10]. Вопросу получения прочных химических соединений внутри искусственного массива уделено достаточно много научный работ, но без внимания остается взаимодействие этих соединений при различных нагрузках на контуре создаваемого объема, а также с химическими элементами, которые содержат окружающие горные породы. В работе авторы отмечают, что создание игольчато-древовидной структуры кристаллов является важной составляющей для комплекса физико-механических свойств искусственно создаваемого материала, а именно материал приобретает твердость и устойчивость к ударным нагрузкам. Данный успех возможен при введении в состав закладочных смесей магниезиальных вяжущих, с помощью которых значительно сокращается время твердения: через сутки прочность магниезиального камня составляет 35 – 50%, а через 7 суток – 60 – 90% от конечной прочности. Сроки схватывания магниезиального вяжущего несколько короче, чем у портландцемента: начало – не ранее 20 мин, конец – не позднее 6 ч от момента затворения [11].

Таким образом, размещение химических элементов и образование ими структурных связей в объеме искусственно создаваемого массива имеет важное значение для его устойчивости к обнажению горными работами при воздействии на него импульсных нагрузок в виде взрывных работ или стационарной нагрузки силами гравитации от окружающего природного горного массива. Прочность внутренних связей искусственно создаваемого массива с окружающими породами может иметь как положительное значение, так и отрица-

тельное последствие. Последующая выемка полезного ископаемого на контакте с искусственным массивом приведет к внутреннему его разрушению, и, как следствие, к загрязнению отбитой горной массы химическими элементами, находящимися в закладочной смеси.

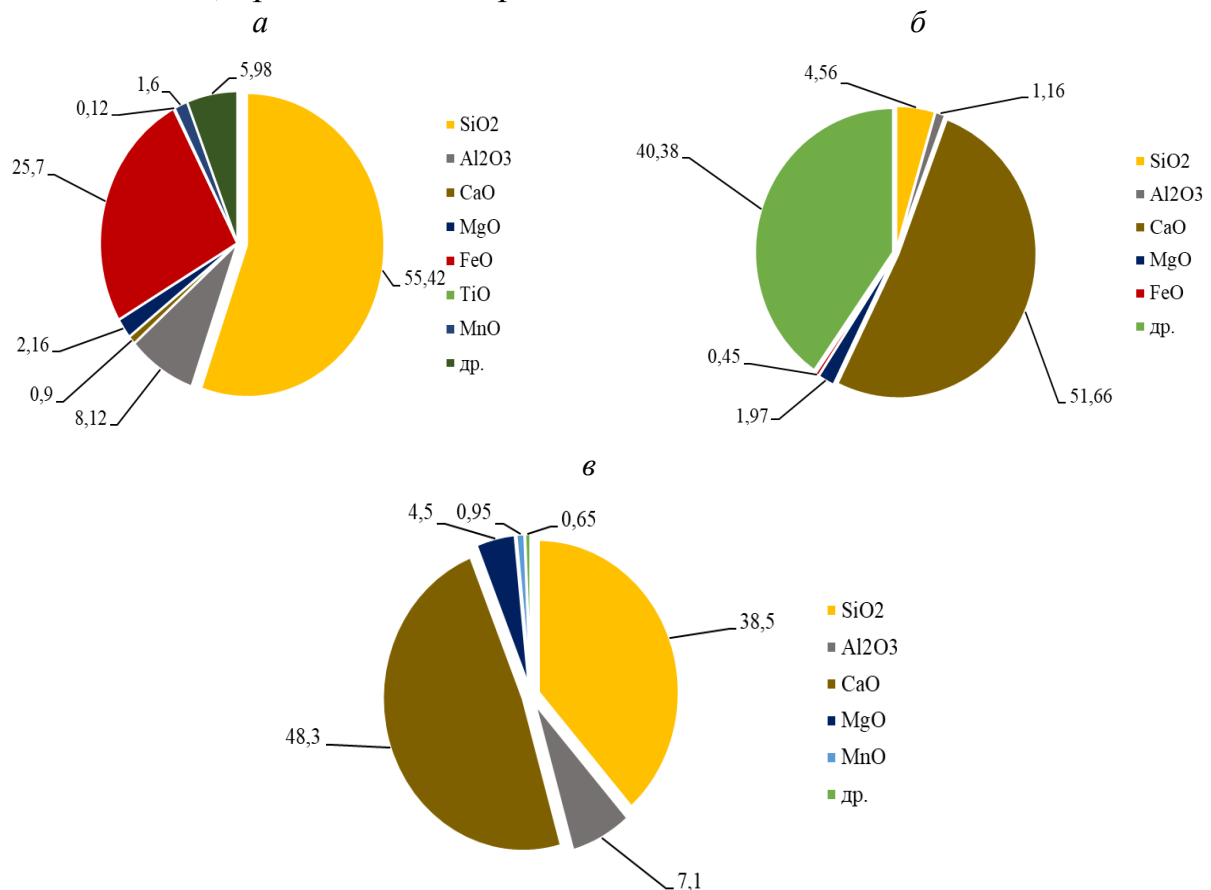
**Методика исследований.** Рентгенофазовый анализ компонентов закладочной смеси проводили на установке ДРОН-2. Подготавливались тонкодисперсные пробы компонентов закладки крупностью менее 0,06 мм и фиксировались межплоскостные расстояния ( $d$ ) при интенсивности отражения ( $I$ ). По справочным данным устанавливались химические вещества [12].

Исследование формирования структуры цементного камня проводилось на образцах при разной степени измельчения шлака металлургического производства, а, следовательно, и увеличения разрыва сростков кристаллов и раскрытия поверхности минералов магния и кальция, как основных цементирующих химических элементов. Остальные фрагментации, составляющие закладочную смесь, принимались без дополнительного дробления, т.е. содержащие вяжущие в горных породах не измельчались и не изменяли свои размеры. Рассев по фракциях соблюдался постоянным. Методика исследований формирования структуры и прочности цементного камня в закладочной смеси применялась стандартная и первые пробы были исследованы спустя один месяц после затворения водой серии образцов при разной степени измельчения металлургического шлака [2]. Микроструктура образцов искусственного камня закладочной смеси изучалась при помощи растровой электронной микроскопии на микроскопе-микроанализаторе РЕММА-102-02. Формы структур образцов имели увеличение 50 мкм, что позволяло получить качественные фотографии, а встроенный рентгеноспектральный микроанализатор – возможность производить замеры химического состава структурных новообразований. Степень влияния мелкодисперсных частиц на структурные и прочностные особенности твердеющей закладки исследовались с пробами тонкоизмельченного доменного гранулированного шлака, отходов флюсового известняка со средним диаметром частиц 20 мкм, кварц-хлорит-серицитовых пород крупностью –1,25 мм, а также при изломах образцов цементного камня, сформированного при различной удельной поверхности 2000, 2800, 4300 и 6600 см<sup>2</sup>/г.

В каждом образце содержание оксидов CaO, SiO<sub>2</sub>, MgO, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> измерялось от 1 до 5 раз при помощи микрорентгеноспектрального анализатора. Методикой замеров химического состава предусматривалось исследование всего поля частиц на снимке для установления частиц вещества разного химического состава или содержанием оксидов. Полученные спектры оксидов обрабатывались программным продуктом, находящимся в микроскопе, производился расчет данных спектров и вывод на ПК содержания оксидов в процентном соотношении. Метод исследований основан на определении контрастов электронного изображения дифракцией электронов.

**Результаты исследований.** Большие объемы заполнения закладочными смесями искусственно созданных полостей приходится на разработку мощных рудных залежей с высоким содержанием полезных компонентов в ископаемых,

при выемке которых, образуется выработанное пространство. При сложившихся схемах выемки полезного ископаемого закладочные смеси контактируют, как с рудным массивом, так и вмещающими породами [13, 14]. Так, на шахте «Эксплуатационная» ЗАО «ЗЖРК», разрабатывающей мощную рудную залежь Южно-Белозерского месторождения, представленную в основном, из гематит-мартитовой, мартитовой руды, чередуясь по простиранию в различном сочетании (мартит-гематитовая) включая прослойки кварц-хлоритовых и кварц-гематит-хлоритовых сланцев, изменяясь от слоистой до массивной. Вмещающими породами по контуру искусственной полости являются сланцы кварц-хлорит-серицитового, кварц-серицит-хлоритового и кварц-гематит-хлоритового состава [15]. Они также служат добавками к составу закладочной смеси, состоящей из флюсового доломита, дробленной породы и молотых шлаков металлургического производства [16]. В их составе находятся следующие химические элементы, приведенные на рис. 1.



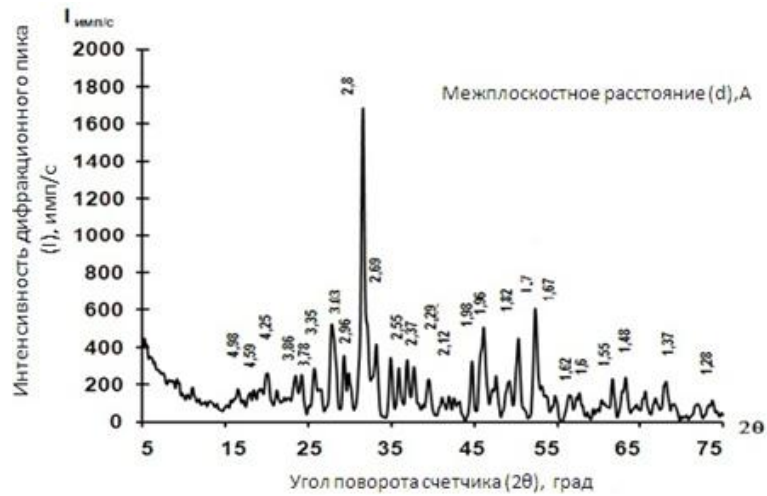
а – дробленая отвальная порода; б – флюсовый доломит; в – шлаки металлургического производства

Рисунок 1 – Усредненный химический состав закладочных материалов, %:

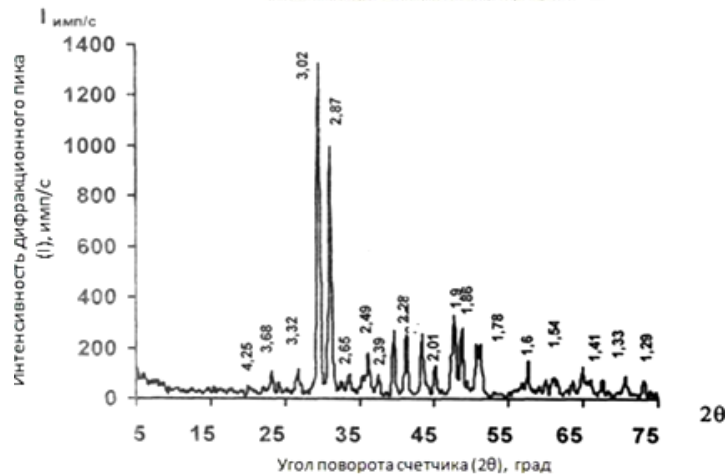
Результаты рентгенофазового анализа минералов, входящих в состав закладочных материалов, приведены на рис. 2. Проведенными исследованиями установлено, что доменный шлак (рис. 2а) содержит мелилит, близкий по составу к окерманиту, и псевдоволластонит. На рентгенограмме мелилиту принадлежат дифракционные пики ( $d/n = 4,25; 3,03; 2,8; 2,29; 1,7; 1,67; 1,37$ ). Данный минерал яв-

ляет собой твердые расплавы минералов окерманита и геленита, поэтому встречаются мелилиты с переменным содержанием  $Al_2O_3$  и  $MgO$ . Псевдоволластониту соответствуют основные дифракционные максимумы ( $d/n=2,8; 1,96; 1,82; 1,47$ ).

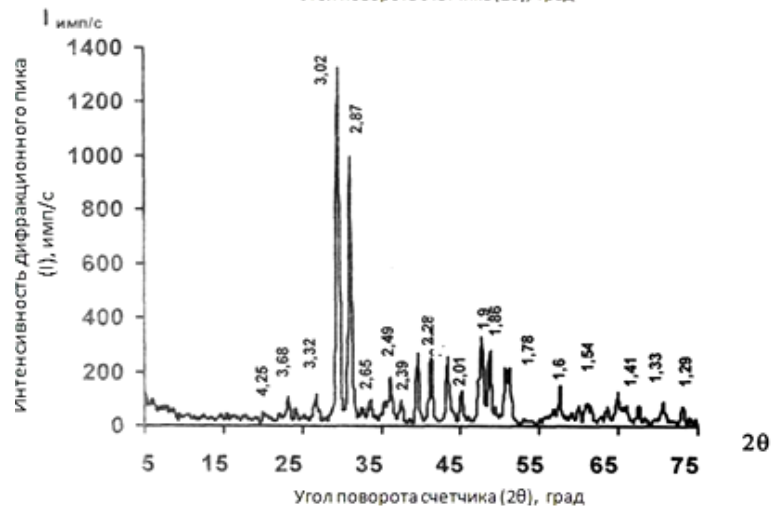
а)



б)



в)



*a* – доменный шлак; *б* – отходы флюса; *в* – горная порода

Рисунок 2 – Рентгенограммы закладочных материалов

Превосходство интенсивности дифракционных максимумов мелилита над псевдоволластонитом свидетельствует о большем его содержании в доменном шлаке.

Результаты исследования отходов флюса (рис. 2б) показали, что в нем содержится кальцит ( $d/n = 3,029; 1,912; 2,28$ ), доломит ( $d/n = 2,65; 1,78; 1,54$ ) и в качестве примеси – волластонит ( $d/n = 2,18; 1,76; 1,92$ ).

Исследования дробленных горных пород (рис. 2в) показали, что в них преобладают минералы класса слюд, которые представлены биотитом ( $d/n = 3,32; 2,33; 1,72$ ), мусковитом ( $d/n = 3,32; 1,94; 1,72$ ), хлоритом ( $d/n = 7,01; 2,12; 1,53$ ) и гематитом ( $d/n = 2,43; 1,35; 1,31$ ).

В составе горных пород присутствуют химические элементы, которые при излечении могут вступать в химические реакции и способствовать образованию твердого камня. В качестве наполнителя в закладочную смесь добавляют вмещающие породы, которые содержат мусковит ( $\text{KAl}_2[\text{AlSi}_3\text{O}_{10}](\text{OH})_2$ ) и хлоритом ( $(\text{Mg, Fe})_3(\text{Si, Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_2 \cdot (\text{Mg, Fe})_3(\text{OH})_6$ ) и биотит ( $\text{K}(\text{Mg, Fe})_3[\text{Si}_3\text{AlO}_{10}] \cdot [\text{OH, F}]_2$ ), а также кристаллизованную воду. В их составе находится магний и силиций в небольших пропорциях, что способствует твердению жидких закладочных смесей после заполнения искусственной полости. Аналогичные по химическому составу горные породы находятся на контуре заполняемого объема. Поэтому можно утверждать, что процессы образования внутренних связей будут аналогичными, происходящими в формировании твердой фазы искусственного массива.

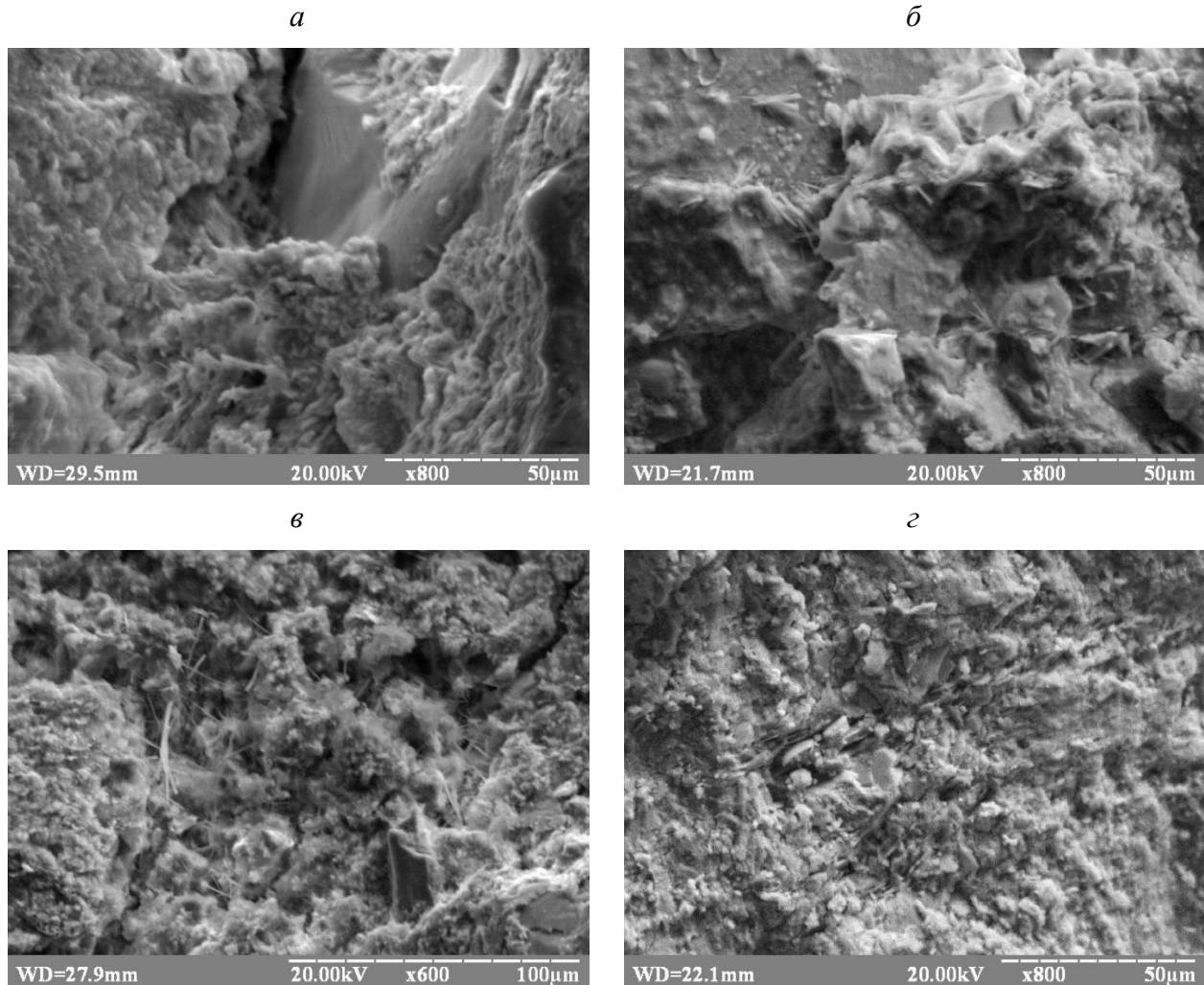
Создание более прочного искусственного массива, требует добавления портландцемента, который хорошо воспринимает сжимающие нагрузки, но непрочен при возникновении растягивающих нагрузок. Обнажение затвердевшего искусственного массива очистными работами с отбойкой руды взрывными работами в местах концентрации напряжений приводит к обрушению, как вертикальных, так боковых поверхностей. Иногда объемы обрушений приобретают значительные величины, что свидетельствует о недостаточной прочности массива противостоять возникающим нагрузкам, как внутри его, так и на контуре обнажения, где отмечается концентрация растягивающих напряжений [17-19]. Для снижения загрязнения рудной массы составляющими компонентами закладочной смеси, на шахте «Эксплуатационная» ЗАО «ЗЖРК» применяют инертный наполнитель, содержащий в химическом составе известняковые минералы – кальцит и доломит, положительно влияющие на процесс выплавки чугуна и стали. Для замены дорогостоящего портландцемента и снижения тепловыделения при его гидратации применяют молотый доменный гранулированный шлак, содержащий мелилит, близкий по составу к окерманиту, и псевдоволластонит, которые проявляют способность гидратации при их измельчении.

Результаты исследования структуры цементного камня в зависимости от удельной поверхности частиц вяжущих веществ – шлака и флюсового известняка – представлены на рис. 3.

Образцы первой серии (Рис. 3а) содержали доменный шлак с удельной поверхностью  $2000 \text{ см}^2/\text{г}$  (степень измельчения, применяемая в промышленных условиях шахты «Эксплуатационная»).

На образце четко выражены две крупные частицы наполнителя, соединяемые между собой слабозакристаллизованным новообразованиями гидросиликата кальция, находящееся в гелеобразном состоянии. Кристаллические новооб-

разования имеют плотные, округло-неопределенные формы частиц с выступающими неупорядоченными редкими одиночными иглами и пластинками.



*а, б, в, г* – при измельчении 2000, 2800, 4300 и 6600  $\text{см}^2/\text{г}$  соответственно

Рисунок 3 – Образцы формирования гелеобразной массы цементного камня в закладочной смеси в зависимости от измельчений металлургического шлака

При данной структуре не может противостоять растягивающим напряжениям, которые возникают на контуре закладочного массива. Находясь в плотном контакте с горными породами или рудной залежью при ее разрушении взрывом искусственный массив будет разрушаться, что и происходит на практике в условиях разработки рудных запасов Южно-Белозерского месторождения.

При затворении образцов второй серии с измельченными доменным шлаком и отходами флюса до удельной поверхности 2800  $\text{см}^2/\text{г}$  (Рис. 3б) процесс твердения характеризуется структурными изменениями, что выражается в появлении сростков игольчатой формы и присутствием гидросиликатного геля округлой, пирамидальной и многогранной форм. Прочность образца закладочной смеси на одностороннее сжатие увеличивается в 1,8 – 2,5 раза в сравнении с об-

разцами первой серии, где удельной поверхностью измельчения доменного шлака становила  $2000 \text{ см}^2/\text{г}$ .

В третьей серии образцов доменный шлак и отходы флюса имели удельную поверхность  $4300 \text{ см}^2/\text{г}$ , что кардинально повлияло на формирование структуры новообразования (Рис. 3в). Гидросиликаты кальция имеют игольчато-волокнистую и остроугольную форму, частиц распределены плотно в отношении друг к другу, уменьшилась пористость, зерна инертного заполнителя гидратными образованиями полностью покрыты. Происходит армировка кристаллическими новообразованиями искусственного камня, увеличиваются силы сцепления и повышается сопротивляемость нагрузкам внутренних связей. Структура новообразований приобретает остроугольную форму, заменяя округлую форму, свойственную образцам первой и второй серии. Прочностные свойства образца закладочной смеси на одностороннее сжатие увеличивается в  $3,1 - 3,5$  раза в сравнении с образцами первой серии, что явно демонстрирует доминирующее влияние степени раскрытия сростков магния и кальция на структурные изменения за одинаковый период времени твердения цементного камня.

Влияние тонкости измельчения доменного шлака и отходов флюса на структуру новообразований изучались в четвертой серии образцов при удельной поверхности частиц  $6600 \text{ см}^2/\text{г}$ . Исследованиями структуры новообразования установлено, что они имеют мелкокристаллическую и слоисто-пластинчатую форму, частицы плотно прилегают друг к другу, а пористость практически отсутствует (Рис. 4 з). Вследствие этого, игольчатая форма гидросиликатов кальция не формируется из-за отсутствия пор в структуре, необходимых для роста кристаллов. Прочность образца закладочной смеси на одностороннее сжатие увеличивается в  $3,1 - 4,5$  раза в сравнении с образцами первой серии.

Следует отметить, что на образцах четвертой серии наблюдается значительный разброс прочности на одноосное сжатие и практически находится в одном числовом интервале с прочностью образцов третьей серии. Это можно объяснить тем, что в качестве наполнителя применяются вмещающие породы с разным содержанием химических элементов  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , участвующих в образовании цементного камня (закладочный массив).

Вмещающие породы представлены широким спектром минералогических разновидностей, где содержание  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$  изменяется на порядок по отношению к другим породам. В горных породах магнетит-сидероплазитовых образований содержание  $\text{MgO} = 2,76\%$  и  $\text{CaO} = 2,76\%$ , тогда как в хлорит-сидероплазитовых образованиях содержание  $\text{MgO} = 3,06\%$  и  $\text{CaO} = 0,15\%$ , а магнетит-карбонат-хлоритовых образований –  $\text{MgO} = 5,3\%$ ,  $\text{CaO} = 2,08\%$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 4,77\%$ . Наименьшее содержание полезных химических элементов содержится в породных сидероплазит-магнетитовых образованиях  $\text{MgO} = 1,08\%$ ,  $\text{CaO} = 0,12\%$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3 = 0,77\%$ , что имеет значение для образования цементного камня.

Образование гелеобразного состояния в образцах можно объяснить большей инертностью при взаимодействии  $\text{MgO}$  с водой  $\text{H}_2\text{O}$  по сравнению  $\text{CaO}$ . Реакция начинается не мгновенно, а только спустя некоторое время. Вокруг



$Mg(OH)_2$  образуется пленка, которая препятствует проникновению воды внутрь зерен. Дальнейшее измельчение гранулированного шлака и флюсов увеличивает удельные поверхности  $CaO$  и  $MgO$ , способствуя вступать в реакцию большее число частиц. В закладочной смеси основное содержание  $CaO = 47,4 - 49,4$  % находится в гранулированном шлаке, отходах флюсового производства  $CaO = 51,66$  % и только до 1 % в дробленых породах. В этих компонентах смеси окислы  $MgO$  составляют 3,75 – 5,00, 1,97 и 2,16 % соответственно. Общее число раскрытых сростков  $MgO$  в смеси увеличивается, с учетом его содержания в дробленых породах и при соответственных условиях гидратации (38 до 42 кДж/кг) находится в стабильной форме кристаллизации. При меньшей степени раскрытия сростков  $MgO$  (образцы первой серии) образование  $Mg(OH)_2$  имеет метастабильную форму, представленную гелем. Это происходит по причине увеличения температуры воды до кипения, и гидратация прекращается.

Как отмечалось авторами в работе [11] игольчато-древовидной структуры кристаллов является важной составляющей для комплекса физико-механических свойств искусственно создаваемого материала и магнезиальные вяжущие повышают прочность за короткий промежуток времени. Авторы утверждают, что затворение  $MgO$  растворами солей, повышает прочность на растяжение затвердевшего камня до 10 МПа и более. В производственных условиях это возможно, при затворении закладочной смеси шахтными водами без очистки, так как подземные воды содержат много различных солей. Но при этом образуются слабые кислоты, которые влияют на процесс гидратации. При наличии хлора на первоначально произойдет образование гидроксихлорида магния  $MgCl_2 \cdot 5Mg(OH)_2 \cdot 7H_2O$ , который со временем распадется на  $MgCl_2 \cdot 3Mg(OH)_2 \cdot 7H_2O$  и  $Mg(OH)_2$ . Последний кристаллизуется в виде волокон, которые будут работать на растяжение.

Этот вопрос требует дальнейшего изучения, так как выполнение работ по заполнению подземных пустот предусматривает транспортирование закладочной смеси к месту ее укладки, а это время, при котором смесь находится в затворенном состоянии. Жидкость является рабочим телом при транспортировании закладочной смеси и ее загустение приведет к остановке процесса и аварийной ситуации. В дальнейшем это является вопросом технологии выполнения того или иного выполнения работ. Так же это касается вопросов заполнения полостей при подземном сжигании угольных пластов, где температура горения становится 1200 – 1500°C, что безусловно повлияет на процесс гидратации.

**Выводы.** В результате выполненных исследований установлено, что образование твердой массы при заполнении искусственных полостей в земной коре зависит от состава химических элементов в новообразовании и воды, а также от функционального назначения цементного камня по восприятию нагрузок от внешнего воздействия. Степень измельчения компонентов в твердой фазе закладочной смеси существенно влияет на структуру образования твердой массы и ее прочность, но находится в определенном интервале раскрытия сростков, являющимися носителями химических элементов и их значения в формировании структуры цементного камня.

При формировании искусственного массива в горном массиве необходимо учитывать химический состав геологических образований, так это фактор может существенно влиять на прочностные характеристики восприятия внешних нагрузок. Применение растворов солей для затворения закладочной смеси в горном производстве требует технологических решений по выполнению этого вида работ с учетом экономической целесообразности и экологической безопасности при охране недр.

#### СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Битимбаев М.Ж., Крупник Л.А., Шапошник Ю.Н. Теория и практика закладочных работ при разработке месторождений полезных ископаемых. -Алматы: Издательство Ассоциации ВУЗов РК, 2012. 624 с.
2. Кузьменко А.М., Петлёванный М.В., Усатый В.Ю. Твердеющая закладка при отработке рудных крутых залежей в сложных горно-геологических условиях. -Днепропетровск: Национальный горный университет, 2015. 139 с.
3. Ступник Н.И., Письменный С.В. Перспективные технологические варианты дальнейшей отработки железорудных месторождений системами с массовым обрушением руды / Вісник Криворізького національного університету. 2012. №1(30). С.3-7.
4. Шрайбер А.А., Редькин В.Б. Современные и перспективные технологии добычи угля / Проблеми загальної енергетики. 2008. №17. С. 7-13.
5. Bondarenko V., Russkikh V., Malashkevich D., Sotskov V. Technological scheme and equipment for selective extraction of coal with long clearing faces / Journal of Donetsk Mining Institute. 2017. No. (2). P. 19-24. <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2017-2-19-24>
6. Lozynskiy V., Saik P., Petlovanyi M., Sai K., Malanchuk Ye. Analytical research of the stress-deformed state in the rock massif around faulting / International Journal of Engineering Research in Africa. 2018. No. 35. P. 77-88. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JERA.35.77>
7. Falshtynskiy V., Saik P., Lozynskiy V., Dychkovskiy R., Petlovanyi M. Innovative aspects of underground coal gasification technology in mine conditions / Mining of Mineral Deposits. 2018. No. 12(2). P. 68-75. <https://doi.org/10.15407/mining12.02.068>
8. Bondarenko V., Sviatkina O., Sai K. Study of the formation mechanism of gas hydrates of methane in the presence of surface-active substances / Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2017. No. 5/6(89). P. 48-55. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.112313>
9. Кузьменко А.М., Петлёванный М.В. Формирование закладочного массива на основе тонкодисперсных частиц вяжущих материалов при подземной разработке рудных месторождений / Металлургическая и горнорудная промышленность. 2013. №2. С. 70-73.
10. Ghirian A., Fall M. Properties of cemented paste backfill / Paste Tailings Management. Bern: Springer, 2017. P. 59-109. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-39682-8\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-39682-8_4)
11. Иванков С.И., Иванова В.В., Петкевич Д.Г. Магнезиальные вяжущие как современный, экологически безопасный строительный материал / Научные и технические аспекты охраны окружающей среды. 2014. №1. С. 49-65.
12. Горшков В.С., Тимашев В.В., Савельев В.Г. Методы физико-химического анализа вяжущих веществ. -Москва: Высшая школа, 1981. 335 с.
13. Кузьменко А.М., Петлёванный М.В. Влияние структуры горного массива и порядка отработки камерных запасов на разубоживание руды / Геотехнічна механіка. Дніпропетровськ: ІГТМ НАНУ, 2014. №118. С. 37-45.
14. Khomenko O., Kononenko M., Petlyovanyu M. Investigation of stress-strain state of rock massif around the secondary chambers / Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining. London: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2014. P. 241-245. <https://doi.org/10.1201/b17547-43>
15. Kuzmenko O., Petlovanyi M. Interrelation of structural changes of the enclosing massif with sustainability of extraction chamber during iron ore deposit development / Journal of Donetsk Mining Institute. 2017. No. 2. P. 56-61. <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2017-2-56-61>
16. Kuzmenko O., Petlyovanyu M., Stupnik M. The influence of fine particles of binding materials on the strength properties of hardening backfill / Mining of Mineral Deposits. London: CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013. P. 45-48. <https://doi.org/10.1201/b16354-10>
17. Zhu P., Song W., Cao S. Tensile mechanical response mechanism of cemented backfills under blasting load / Journal of Mining and Safety Engineering. 2018. No. 35(3). P. 605-611. <https://doi.org/10.13545/j.cnki.jmse.2018.03.022>
18. Cao S., Song W., Yilmaz E. Influence of structural factors on uniaxial compressive strength of cemented tailings backfill / Construction and Building Materials. 2018. No. 174. P. 190-201. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.126>
19. Кузьменко А.М., Петлёванный М.В. Разрушение закладочного массива в зависимости от технологии его возведения / Збірник наукових праць Національного гірничого університету. Дніпро: Національний гірничий університет, 2017. №52. С. 159-166.

#### REFERENCES

1. Bitimbaev, M.Zh., Krupnik, L.A. and Shaposhnik, Yu.N. (2012), *Teoriya i praktika zakladochnykh robot pri razrabotke mestorozhdeniy poleznykh iskopaemykh* [Theory and practice of backfilling during the mining of mineral deposits], Izdatelstvo Assotsiatsii VUZov RK, Almaty, Kazakhstan.
2. Kuzmenko, A.M., Petlevanyy, M.V. and Usatyy, V.Yu. (2015), *Tverdeyushchaya zakladka pri otrabotke rudnykh krutykh za-*

*lezhey v slozhnykh gomo-geologicheskikh usloviyakh* [Hardening backfilling during mining ore steep deposits in difficult geological conditions], *Natsionalnyy gornyy universitet, Dnipro, Ukraine*.

3. Stupnik, N.I. and Pismenny, S.V. (2012), "Perspective technological options for further mining of iron ore deposits with systems with massive ore destruction", *Journal of Kryvyi Rih National University*, vol. 1, no. 30, pp. 3-7.

4. Shrayber, A.A. and Redkin, V.B. (2008), "Modern and advanced coal mining technologies", *Problems of General Energy*, no. 17, pp. 7-13.

5. Bondarenko, V., Russkikh, V., Malashkevich, D. and Sotskov, V. (2017), "Technological scheme and equipment for selective extraction of coal with long clearing faces", *Journal of Donetsk Mining Institute*, no. 2, pp. 19-24. <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2017-2-19-24>

6. Lozynskiy, V., Saik, P., Petlovanyi, M., Sai, K. and Malanchuk, Ye. (2018), "Analytical research of the stress-deformed state in the rock massif around faulting", *International Journal of Engineering Research in Africa*, no. 35, pp. 77-88. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/JERA.35.77>

7. Falshtynskiy, V., Saik, P., Lozynskiy, V., Dychkovskiy, R. and Petlovanyi, M. (2018), "Innovative aspects of underground coal gasification technology in mine conditions", *Mining of Mineral Deposits*, vol. 12, no. 2, pp. 68-75. <https://doi.org/10.15407/mining12.02.068>

8. Bondarenko, V., Svetkina, O. and Sai, K. (2017), "Study of the formation mechanism of gas hydrates of methane in the presence of surface-active substances", *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, vol. 5/6, no. 89, pp. 48-55. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.112313>

9. Kuzmenko, A.M. and Petlevanyy, M.V. (2013), "Formation of an array on the basis of finely divided particles of binder materials under underground mining of ore deposits", *Metallurgical and Mining Industry*, no. 2, pp. 70-73.

10. Ghirian, A. and Fall, M. (2017), "Properties of cemented paste backfill", *Paste Tailings Management*, pp. 59-109. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-39682-8\\_4](https://doi.org/10.1007/978-3-319-39682-8_4)

11. Ivankov, S.I., Ivanova, V.V. and Petkevich, D.G. (2014), "Magnesian binders as a modern, environmentally friendly building material", *Scientific and Technical Aspects of Environmental Protection*, no. 1, pp. 49-65.

12. Gorshkov, V.S., Timashev, V.V. and Savelyev, V.G. (1981), *Metody fiziko-khimicheskogo analiza vyazhushchikh veshchestv* [Methods of physicochemical analysis of binder materials], Vysshaya shkola, Moscow, Russia.

13. Kuzmenko, A.M. and Petlyovany, M.V. (2014), "Influence of rock massif structure and sequence of chamber reserves mining on ore dilution", *Geo-Technical Mechanics*, no. 118, pp. 37-45.

14. Khomenko, O., Kononenko, M. and Petlyovanyy, M. (2014), "Investigation of stress-strain state of rock massif around the secondary chambers", *Progressive Technologies of Coal, Coalbed Methane, and Ores Mining*, pp. 241-245. <https://doi.org/10.1201/b17547-43>

15. Kuzmenko, O. and Petlovanyi, M. (2017), "Interrelation of structural changes of the enclosing massif with sustainability of extraction chamber during iron ore deposit development", *Journal of Donetsk Mining Institute*, no. 2, pp. 56-61. <https://doi.org/10.31474/1999-981x-2017-2-56-61>

16. Kuzmenko, O., Petlyovanyy, M. and Stupnik, M. (2013), "The influence of fine particles of binding materials on the strength properties of hardening backfill", *Mining of Mineral Deposits*, pp. 45-48. <https://doi.org/10.1201/b16354-10>

17. Zhu, P., Song, W. and Cao, S. (2018), "Tensile mechanical response mechanism of cemented backfills under blasting load", *Journal of Mining and Safety Engineering*, vol. 35, no. 3, pp. 605-611. <https://doi.org/10.13545/j.cnki.jmse.2018.03.022>

18. Cao, S., Song, W. and Yilmaz, E. (2018), "Influence of structural factors on uniaxial compressive strength of cemented tailings backfill", *Construction and Building Materials*, no. 174, pp. 190-201. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.04.126>

19. Kuzmenko, A.M. and Petlovanyi, M.V. (2017), "Backfilling massif failure depending on construction technology", *Collection of research papers of National Mining University*, no. 52, pp. 159-166.

#### Об авторах

**Кузьменко Александр Михайлович**, доктор технических наук, профессор, профессор кафедры подземной разработки месторождений, Национальный технический университет «Днепропетровская политехника» МОН Украины (НТУ «ДП» МОН Украины), Днепр, Украина, [kuzmalexx@gmail.com](mailto:kuzmalexx@gmail.com)

**Петлёваный Михаил Владимирович**, кандидат технических наук, доцент кафедры подземной разработки месторождений, Национальный технический университет «Днепропетровская политехника» МОН Украины (НТУ «ДП» МОН Украины), Днепр, Украина, [petlyovany@ukr.net](mailto:petlyovany@ukr.net)

**Лозинский Василий Григорьевич**, кандидат технических наук, доцент кафедры подземной разработки месторождений, Национальный технический университет «Днепропетровская политехника» МОН Украины (НТУ «ДП» МОН Украины), Днепр, Украина, [lvj.nmu@gmail.com](mailto:lvj.nmu@gmail.com)

#### About the authors

**Kuzmenko Oleksandr Mykhailovych**, Doctor of Technical Sciences (D.Sc.), Professor, Professor of the Underground Mining Department, Dnipro University of Technology MSE of Ukraine, Dnipro, Ukraine, [kuzmalexx@gmail.com](mailto:kuzmalexx@gmail.com)

**Petlovanyi Mykhailo Volodymyrovych**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor of the Underground Mining Department, Dnipro University of Technology MSE of Ukraine, Dnipro, Ukraine, [petlyovany@ukr.net](mailto:petlyovany@ukr.net)

**Lozynskiy Vasyl Hryhorovych**, Candidate of Technical Sciences (Ph.D.), Associate Professor of the Underground Mining Department, Dnipro University of Technology MSE of Ukraine, Dnipro, Ukraine, [lvj.nmu@gmail.com](mailto:lvj.nmu@gmail.com)

**Анотація.** Наведено результати досліджень впливів хімічних елементів твердіючої маси сумішей на їх міцнісні характеристики та новоутворення при заповненні штучних порожнин у земній корі. Запропоновано комплексний методичний підхід до дослідження, що включає хімічний і рентгенофазовий аналіз мінерального складу компонентів закладної суміші, метод растрової електронної мікроскопії, мікрорентгеноспектральний аналіз, експериментальні дослідження з визначення міцності на одноосьове стискання зразків. Досліджено хімічний і мінералогічний склад компонентів закладної суміші методом рентгенофазового аналізу та виявлено їх характер впливу на структуру цементного каменю. Встановлено вплив ступеня розкриття зростків у компонентах закладної суміші й питомої поверхні часток, що містять цементоутворюючі хімічні елементи на структуру новоутворень та її міцність. Надана кількісна оцінка зміни міцності штучного каменю в інтервалі питомої поверхні в'язучого матеріалу 2000 – 6600 см<sup>2</sup>/г. Акцентовано увагу на важливості переходу гелеподібного стану новоутворень цементного каменю до кристалічного. Вивчено аспекти взаємовпливу оксидів CaO, MgO в доменному гранульованому шлаку, флюсових вапняках і відвальних подрібнених породах на міцність твердіючої суміші. Показано, що ступінь подрібнення компонентів у твердій фазі закладної суміші істотно впливає на структуру утворення твердої маси і її міцність, але знаходиться в певному інтервалі розкриття зростків, які є носіями хімічних елементів і їх значення у формуванні структури цементного каменю. При формуванні штучного масиву в гірському масиві необхідно враховувати хімічний склад геологічних утворень, оскільки цей фактор може суттєво впливати на міцнісні характеристики сприйняття зовнішніх навантажень. Затворіння закладної суміші розчинами солей вимагає додаткового вивчення з урахуванням економічної доцільності та екологічної безпеки при охороні надр.

**Ключові слова:** твердіюча суміш, штучний масив, міцність, питома поверхня часток, вміщуючі породи, рентгенофазовий аналіз, растрова мікроскопія.

**Annotation.** In the paper, the investigation results of the effects of chemical elements of solid mass of mixtures on concrete block strength characteristic while filling technogeneous cavities in the earth crust are given. A comprehensive methodological approach to the investigation is proposed. It includes chemical and X-ray phase analysis of the mineral composition of the filling mixture components, scanning microscopy method, X-ray microanalysis, and experimental studies on determining uniaxial compressive strength of the samples. Chemical and mineralogical composition of the filling mixture components was studied by X-ray phase analysis, and influence on concrete block structure was determined. Influence of mineral grain release in components of the filling mixture and specific surface of particles containing cement-forming chemical elements on the concrete block structure and its strength is established. A quantitative estimation of the change of concrete block strength in the range of the specific surface of binder material 2000 – 6600 cm<sup>2</sup>/g is given. Attention is focused on importance of new concrete block transition from gel state to the crystalline one. Aspects of mutual influence of CaO and MgO oxides in the granulated blast-furnace slag, fluxing limestones and crushed dump rocks on the strength of the hardening mixture were studied. It is shown that the degree of grinding of components in the solid phase of the filling mixture significantly affects the structure of formation of solid mass and its strength, but is within a certain interval of disclosure of intergrowths that are carriers of chemical elements and their value in the formation of the structure of cement stone. It is recommended to consider the chemical composition of geological formations when forming an artificial concrete block in the rock massif because this factor can significantly affect the strength characteristics for accepting external loads. Tempering of filling mixture with salt solutions requires additional study with considering economic feasibility and environmental safety for conservation of mineral resources.

**Keywords:** hardening mixture, concrete block, strength, specific grain surface, enclosing rocks, X-ray phase analysis, scanning microscopy.

*Стаття надійшла до редакції 10.11.2018*

*Рекомендовано до друку д-ром техн. наук, проф. Четвериком М.С.*