

справ. изд. / под ред. С. С. Набойченко – М.: Металлургия, 1997. – 542 с. **9.** Степанчук, А. Н. Технология порошковой металлургии [Текст] / А. Н. Степанчук, И. И. Билык, П. А. Бойко – Киев: Вища школа, 1989. – 415 с. **10.** Кетов, В. М. Исследование влияния способа легирования медью на свойства порошковых шихт и характеристики спеченных материалов на основе железа [Текст] / В. М. Кетов, А. А. Внуков, Е. И. Демченко, И. Г. Рослик // Сборник докладов Международного симпозиума «Инженерия поверхности. Новые порошковые композиционные материалы. Сварка» – Минск – 23-25 марта 2011. – С. 153-157.

Bibliography (transliterated): 1. Antsyferov, V., Akimenko, V., Grevnov, L. (1991). Poroshkovye legirovannye stali, 318 p. 2. Yermakov, S., Vyaznikov N. (1990). Poroshkovye stali i izdeliya, 319 p. 3.

Antsyferov, V., Akimenko, V. (1983). Spechennye legirovannye stali, 88 p. 4. Antsyferov, V., Cherepanova, T. (1981). Struktura spechennyh staley, 112 p. 5. Fedorchenko, I., Pugina, L. (1980). Kompozitsionnye spechennye antifriktsionnye materialy, 401 p. 6. Radomyselckiy, I., Serdyuk, G., Scherban, N. (1985). Konstruktsionnye poroshkovye materialy, 152 p. 7. Akimenko, V., Bulanov, V., Rukin, V. (1982). Zheleznye poroshki, 246 p. 8. Naboychenko, S. (1997). Poroshki tsvetnykh metallov: sprav. izd, 542 p. 9. Stepanchuk, A., Bilyk, I., Boyko, P. (1989). Tehnologiya poroshkovoy metallurgii, 415 p. 10. Ketov, V., Vnukov, A., Demchenko, I., Roslik, I. (2011). Issledovanie vliyaniya sposoba legirovaniya mediyu na svoystva shiht i harakteristiki spechennykh materialov na osnove zheleza. Sbornik dokladov mezhdunarodnogo simpoziuma «Inzheneriya poverhnosti. Novye poroshkovye kompozitsionnye materialy. Svarka», Minsk, 153-157.

Поступила (received) 22.10.2015

Сведения об авторах / Відомості про авторів / About the Authors

Внуков Александр Александрович – кандидат технических наук, Национальная металлургическая академия Украины, доцент кафедры "Покрытий, композиционных материалов и защиты металлов"; пр. Гагарина, 4, г. Днепропетровск, Украина, 49600; тел.: 050-138-33-59; e-mail: alvnukov@yandex.ru.

Внуков Олександр Олександрович – кандидат технічних наук, Національна металургійна академія України, доцент кафедри "Покриттів, композиційних матеріалів та захисту металів"; пр. Гагаріна, 4, м. Дніпропетровськ, Україна, 49600; тел.: 050-138-33-59; e-mail: alvnukov@yandex.ru.

Vnukov Alexander – candidate of technical sciences, National Metallurgical Academy of Ukraine; Gagarin av., Dnepropetrovsk, Ukraine, 49600; tel.: 050-138-33-59; e-mail: alvnukov@yandex.ru.

УДК 661.185-3:677.021.127

А. Ф. БУЛАТ, В. А. ИВАНОВ, К. С. ГОЛОВ, В. А. ТКАЧЕНКО, Е. И. СТЕПАНЕНКОВ

ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ГИДРАТАЦИИ ФОСФОГИПСОВОЙ МАТРИЦЫ С РЕДКОЗЕМЕЛЬНЫМ НАПОЛНИТЕЛЕМ НА ЕЕ РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫЕ СВОЙСТВА

Обоснована адекватность предложенной феноменологической модели, в соответствии с которой гидратация фосфогипсовой матрицы приводит к аномально высокому, по сравнению с классическим законом Бугера, росту сечения взаимодействия рентгеновского излучения с радиационно-защитным (РЗ) наполнителем в виде редкоземельных элементов (РЗЭ). Установлена зависимость изменения уровня защиты персонала от рентгеновского излучения конструкциями из композиционного материала на основе фосфогипса от концентрации РЗЭ в нём и плотности материала.

Ключевые слова: фосфогипсовая матрица, гидратация, кристаллизация, наполнитель, редкоземельные элементы, структура, радиационная-защита, ультрадисперсные частицы.

Введение. Впервые эффект аномального ослабления интенсивности проникающего, в частности, рентгеновского излучения был установлен при его взаимодействии с ультрадисперсными частицами (УДЧ) радиационно-защитного (РЗ) наполнителя в диэлектрической матрице. При этом было зафиксировано непрямолинейное распространение рентгеновского излучения по геометрии криволинейного слоя УДЧ РЗ наполнителя, следствием чего является увеличение длины пробега квантов излучения внутри композиционной диэлектрической матрицы и, что естественно, сопровождается аномальным ростом сечения взаимодействия рентгеновского излучения с указанной матрицей. В дальнейшем было установлено [1], что указанный эффект при определенной концентрации УДЧ наблюдается и в полидисперсной смеси частиц РЗ наполнителя. Зафиксированные при этом аномально высокие РЗ свойства композиционной матрицы по сравнению со свойствами, регламентируемыми классическим законом Бугера, авторы [1] объяснили электростатическим взаимодействием поляризованных частиц полидисперсной смеси РЗ наполнителя. Таким образом, из частиц полидисперсной смеси РЗ напол-

нителя самоорганизуется система энергетически взаимосвязанных ансамблей, которые обладают способностью отклонять кванты излучения от прямолинейного распространения и, как следствие, аномально ослаблять интенсивность проникающего излучения [2].

Анализ литературных данных и постановка проблемы. Углубляясь в анализ литературных источников и сравнение разрабатываемых материалов с аналогами, в нашем случае в качестве гидратирующей матрицы, вмещающей РЗ наполнитель, использовалась электропроводная среда в виде фосфогипсового теста [3, 4], которое только после окончания формирования прочных фазовых контактов и сушки приобретает диэлектрические свойства. В результате при взаимодействии рентгеновского излучения с указанной матрицей, содержащей в достаточном количестве УДЧ РЗ наполнителя, также проявляется вышеупомянутый эффект. Однако, в данном случае механизм реализации этого эффекта совершенно иной, чем это имеет место в источнике [1].

Цель и задачи исследования. Оценка влияния структурирующей при гидратации фосфогипсовой

© А. Ф. Булат, В. А. Иванов, К. С. Голов, В. А. Ткаченко, Е. И. Степаненков. 2015

матрицы на РЗ свойства композиционных материалов выполнялась путём тестирования РЗ свойств [5] их образцов на рентгеновском оборудовании с последующим фотографированием кристаллической структуры с помощью растрового электронного микроскопа. При таком подходе представляется цель, заключающаяся в изучении влияния процесса гидратации фосфогипсового вяжущего на приобретаемые композиционными материалами РЗ свойства. При этом обосновано формирование из частиц РЗ наполнителя в виде РЗЭ кристаллической структуры матрицы, такой результирующей структуры композиционного материала, которая соответствует наибольшему уровню величинам РЗ свойств.

Материалы и методы исследований влияния компонентов композиционного материала на РЗ свойства. В процессе проведения сравнительных экспериментальных исследований в настоящей работе предпринята попытка создания композиционных материалов на основе фосфополугидрата сульфата кальция и чистого полугидрата сульфата кальция. Причём чистый полугидрат сульфата кальция, исходные свойства которого регламентируются рядом ГОСТов [2, 3], был выбран нами, прежде всего, с целью сравнительной оценки РЗ характеристик композиционного материала, получаемого на основе использования исходного сырья в виде фосфополугидрата. Фосфополугидрат отличается от стандартного чистого полугидрата лишь наличием примесей. Вполне понятно, что путём очистки фосфополугидрата от примесей можно получить стандартный чистый полугидрат, широко применяемый в настоящее время в строительной индустрии. Однако процесс очистки фосфополугидрата от примесей связан с привлечением довольно трудоёмких и энергозатратных технологических процессов. В ряде случаев необходимость такой очистки не требуется, т.к. при изготовлении довольно широкой номенклатуры РЗ конструкций промышленного назначения в качестве исходного сырья может быть использован и неочищенный фосфополугидрат. В процессе исследований фосфогипс для изготовления экспериментальных образцов подвергался диспергированию с последующей дегидратацией его до фосфополугидрата. В промышленных масштабах выполнение указанных операций необходимо для придания фосфогипсу вяжущих свойств с последующим использованием его в качестве исходного сырья для получения РЗ конструкций промышленного назначения.

Методики определения показателей образцов. Используемые нами методики изготовления экспериментальных образцов размером 10x10x1,2 см и массой 100–120 г на основе как фосфополугидрата, так и чистого полугидрата сульфата кальция идентичны. Подготовка, проведение и обработка результатов исследований выполнялась согласно методикам и требованиям, изложенным в государственных стандартах и в рекомендациях по обработке результатов экспериментов [4].

Фосфополугидрат сульфата кальция в состоянии поставки на предварительном этапе подвергали сушке в сушильном шкафу при температуре 50 °С в течение 1 часа. Такой режим сушки является достаточным для выведения из фосфогипсового вяжущего избыточной

влаги, что является обязательным перед проведением предэксплуатационного тестирования гипсового вяжущего.

Для обеспечения точности необходимого сочетания по массе компонентов в РЗ композиционном материале взвешивание исходных компонентов осуществляли на прецизионных весах WPS 210/C/1. Затем приготавливали суспензию РЗ наполнителя в воде с тщательным ее перемешиванием шнеком в течение 5–10 с до достижения однородности состава, после чего ее выдерживали без какого-либо воздействия в течение 10–20 с в целях предварительного самоудаления пузырьков воздуха. В подготовленную таким образом суспензию вводили расчётное количество фосфополугидрата сульфата кальция и снова перемешивали до получения однородного теста. После этого тесто заливали в прямоугольную форму. Сама же форма находилась на вибростоле, при работе которого происходило окончательное удаление пузырьков воздуха и уплотнение фосфогипсового теста. Свежеприготовленную композицию подвергали прокатыванию вальцами для окончательного формирования прямоугольной формы и удаления избыточного теста.

Отверждение образцов осуществлялось при комнатной температуре на воздухе в течение 20 минут, а последующая сушка осуществлялась в сушильном шкафу 2В-151 при температуре 50–60 °С до приобретения образцами постоянной массы.

В заключение образцы подвергали шлифовке с доведением их до заданной толщины.

Тестирование РЗ свойств образцов проводилось на рентгеновской установке типа «РУМ-20», в которой используется тормозное рентгеновское излучение вольфрамового анода при напряжении в диапазоне 40–125 кВ. При этом источником указанного излучения при различных режимах являлась рентгеновская трубка типа «БД21-150» в составе рентгеновского диагностического излучателя «РИД-2-2».

Для характеристики РЗ свойств исследуемых композиционных материалов, по установившейся практике, использовали величину свинцового эквивалента в мм. Учитывая тот факт, что результаты исследований предназначены для реализации в конструкциях, эксплуатируемых в рентгенологических кабинетах, в частности, в качестве сердечников дверей, обшивки стен, ставней, экранов и др., тестирование образцов проводилось согласно «Инструкции по контролю защитных средств и материалов, используемых при рентгенодиагностике» [4]. Согласно Инструкции материалы, применяемые в рентгенодиагностике, подвергаются тестированию при следующих режимах: ускоряющее напряжение – 100 кВ, количество электричества 10 мА·с, продолжительность экспонирования 0,32 с. Для тарировки величин свинцового эквивалента в качестве эталона был выбран свинец марки СО по ГОСТ 3778-98.

Для оценки РЗ свойств образцов проводился сравнительный анализ плотности почернения негатива рентгеновской пленки с изображением эталонного свинцового ослабителя и каждого из исследуемых образцов композиционного РЗ материала. Для этого было использовано сканирующее устройство EPSON Perfection V700 Photo, с помощью которого был полу-

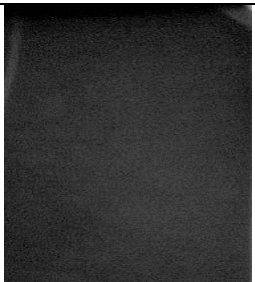
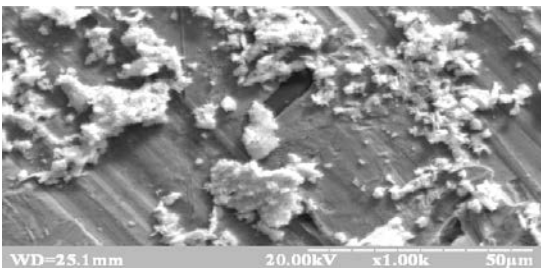
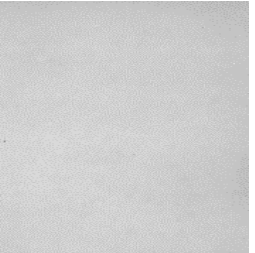
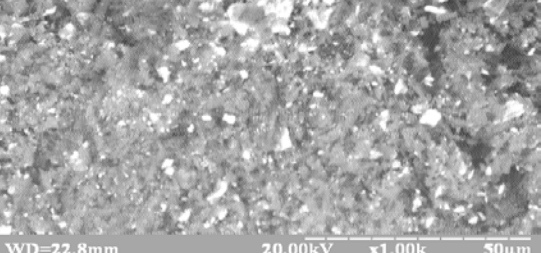
чен электронный (растровый) вариант негатива рентгеновской пленки. Обработку растрового изображения осуществляли с использованием компьютерной программы Adobe Photoshop CS3 Extended. Указанное программное обеспечение даёт возможность определить по плотности почернения негативов рентгеновской пленки с изображениями образцов величины РЗ свойств последних, выраженных в мм свинцового эквивалента.

С использованием указанной методики были проведены сравнительные экспериментальные исследования РЗ свойств композиционных материалов на основе фосфогипсового вяжущего в виде β -полугидрата сульфата кальция (Г-5Б(II) по ДСТУ Б.В.2.7-82-99) с РЗ наполнителями в виде редкоземельных элементов (РЗЭ) по ТУ 8-4-244-87, сульфата

бария (ГОСТ Р 64/228/29 ФС 42-3074-94) и вольфрама (ТУ 48-19-352-91).

Результаты проведенных исследований. Из сопоставительного анализа растровых фотографий частиц сухой полидисперсной смеси РЗЭ «в состоянии поставки» (табл. 1а), после ее активации путем механического перемешивания для образования энергетических ансамблей из частиц РЗЭ в фосфогипсовой матрице после ее гидратации (табл. 1б), установлено, что в результате взаимодействия фосфогипсовой гидратирующей матрицы с агломерированными частицами РЗ наполнителя в виде РЗЭ имеет место существенное возрастание защитных свойств композитного материала, характеризующееся ростом величины свинцового эквивалента.

Таблица 1 – Влияние структуры композиционного материала на его РЗ свойства

| | | Негатив образца | δ_{Pb} , мм | Структура РЗ материала в отраженных электронах (x1 000) |
|---|-----------------------------|---|---------------------|--|
| а | РЗЭ в «состоянии поставки» |  | 0,50 ($\pm 0,05$) |  |
| б | РЗЭ в фосфогипсовой матрице |  | 0,70 ($\pm 0,05$) |  |

В процессе гидратации фосфогипса с соответствующим водопотреблением образуются прочные контакты по границам растущих кристаллов, что обеспечивает образование сросшегося жёсткого кристаллического каркаса фосфогипсового камня.

После завершения гидратации и сушки экспериментальных образцов зафиксированные величины защитных свойств (δ_{Pb} , мм) превышали расчетные значения, регламентируемые классическим законом Бугера. Вполне понятно, что в нашем случае главным фактором в достижении полученного эффекта (из-за

электропроводимости гипсового теста в процессе его гидратации) является не электростатика, а сам процесс гидратации гипсового и, в частности, фосфогипсового вяжущего. Как установлено, в процессе гидратации объем фосфогипсовой матрицы насыщается дополнительным количеством УДЧ РЗЭ, которые образуются благодаря разрушению агломератов РЗЭ [6].

Этапы, предшествующие срастанию гидратирующихся кристаллов фосфогипса и их срастание схематично показаны на рис. 1.

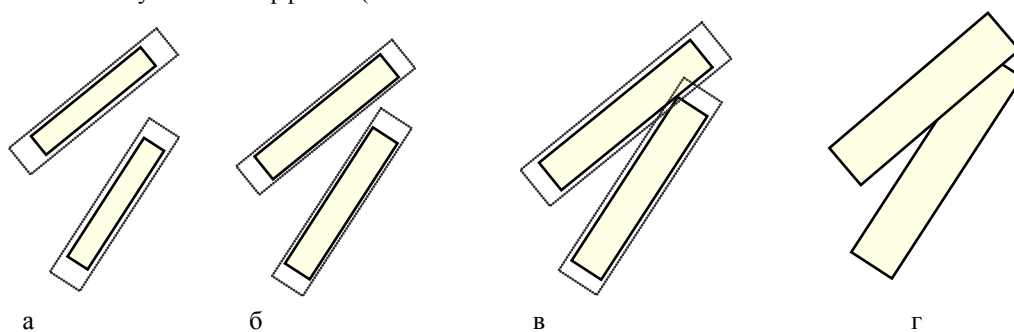


Рис. 1 – Схема процесса срастания гидратирующихся кристаллов фосфогипса: а – начало роста кристаллов; б – коагуляционные структуры; в – условно-коагуляционные структуры; г – срастания по границам кристаллов

Процесс гидратации фосфогипсового вяжущего схематично приведен на рис. 1, является характерным для каждого растущего кристалла фосфогипса. Процесс гидратации обеспечивает разрушение агломерированных частиц РЗЭ (рис. 1) по всему объёму матрицы, что приводит к резкому возрастанию количества распределенных в ней УДЧ.

Обсуждение результатов исследования влияния процесса гидратации кристаллов гипса на приобретаемые РЗ свойства сформированного композиционного материала. Наиболее эффективно разрушение агломератов РЗ наполнителя в виде РЗЭ происходит во время образования коагуляционных структур, так как при этом расстояние между гидратируемыми кристаллами фосфогипса уменьшается до размеров, меньших, чем размеры агломератов РЗ наполнителя. Однако даже в начале образования переплетений и сростков кристаллов, по мере развития процесса гидратации, имеет место движение кристаллических образований. Поэтому, вследствие увеличения длины растущих кристаллов, которая многократно превышает размер УДЧ РЗЭ, а также вследствие подвижки кристаллических образований, происходит защемление агломерированных частиц РЗЭ с последующим отделением от них ультрадисперсной фракции.

Процесс отделения УДЧ при разрушении агломератов РЗЭ идет более эффективнее при гидратации фосфогипсового вяжущего α -модификации по сравнению с эффективностью отделения УДЧ при гидра-

тации того же вяжущего, но β -модификации. Это объясняется тем, что указанным модификациям присуща различная удельная поверхность кристаллов. Так, удельная поверхность кристаллов фосфогипса α -модификации составляет 90–120 м²/кг, в то время как удельная поверхность кристаллов фосфогипса β -модификации составляет 300–500 м²/кг. Данное различие обуславливается размером и формой прогидратировавшихся кристаллов. Более мелкие кристаллы фосфогипсового вяжущего β -модификации упакованы в матрице недостаточно плотно, располагаясь в ней хаотично и занимая больший объем, они не могут эффективно защемлять и разрушать агломераты РЗ наполнителя. В отличие от этого, кристаллы фосфогипсового вяжущего α -модификации упакованы в более плотную структуру, благодаря вытянутости столбчатобразных кристаллов в общем направлении, что обуславливает эффективное защемление и разрушение агломератов РЗ наполнителя.

Эффективность показанного схематично на рис. 2 отделения УДЧ от агломератов РЗЭ будет тем выше, чем, во-первых, большее количество кристаллов фосфогипса принимает участие в процессе гидратации, а, во-вторых, чем больший прирост объема будут иметь кристаллы [6]. При этом замечено, что с повышением продолжительности процесса роста кристаллов повышается и плотность их упаковки в единице объема матрицы [7].

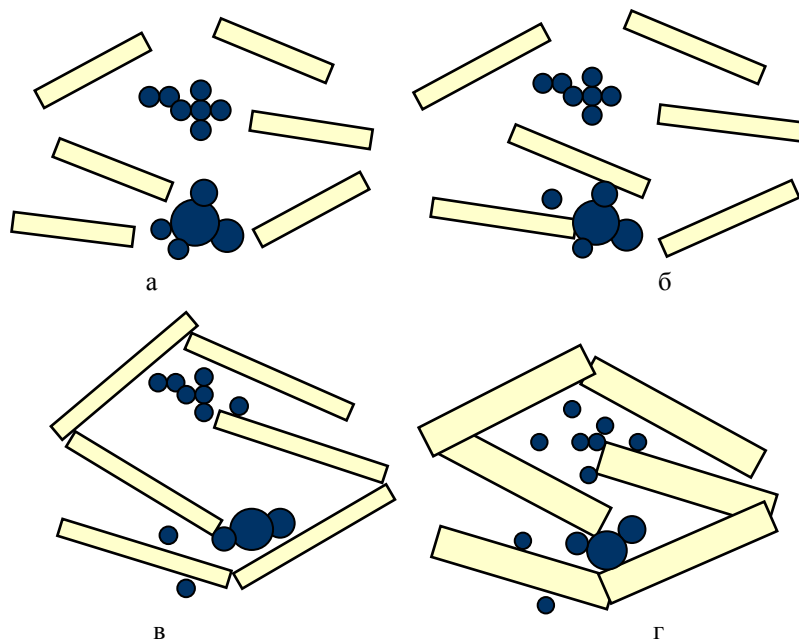


Рис. 2 – Разрушение агломератов РЗЭ растущими кристаллами фосфогипса: а – начало роста кристаллов; б – коагуляционные структуры; в – условно-коагуляционные структуры; г – сростания по границам кристаллов

На рис. 3. схематично показано, что с увеличением количества УДЧ РЗ наполнителя в композитной матрице возрастает число актов взаимодействия с ними рентгеновского излучения. В результате рентгеновское излучение отклоняется от прямолинейного распространения, увеличивая при этом длину своего пробега внутри композитной матрицы. А это, очевидно, эквивалентно увеличению толщины защитного

слоя, что и является причиной аномального увеличения $\delta_{РБ, мм}$ [8–10].

Таким образом, рассмотренная феноменологическая модель влияния гидратации фосфогипсовой матрицы с редкоземельным наполнителем на ее РЗ свойства адекватно отражает впервые вскрытый механизм проявления нового физического эффекта, связанного с отделением от агломерированных частиц РЗ наполнителя УДЧ РЗЭ.

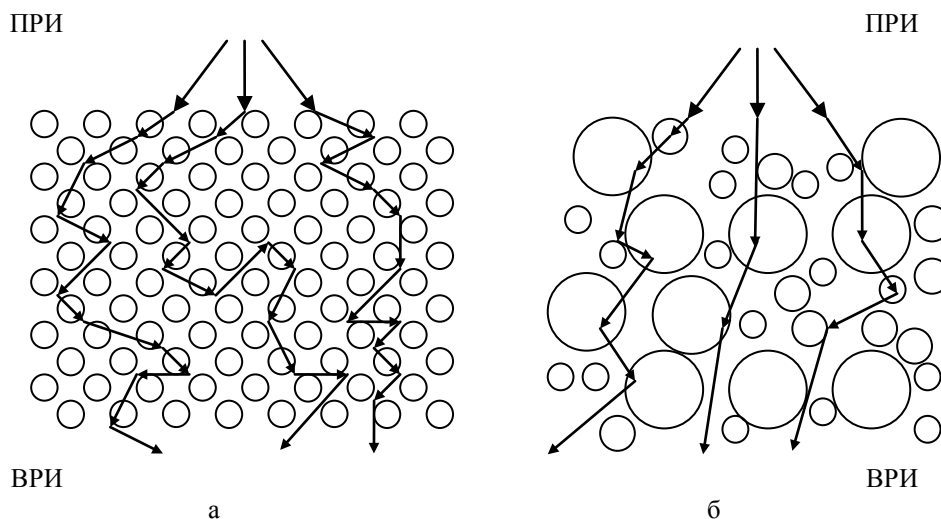


Рис. 3 – Схема взаимодействия первичного рентгеновского излучения (ПРИ) с частицами РЗ наполнителя (прошедшего через защитный слой) с ослаблением его интенсивности до уровня вторичного рентгеновского излучения (ВРИ): а – ультрадисперсный РЗ наполнитель с размером частиц 10^{-8} – 10^{-7} м; б – полидисперсный РЗ наполнитель с размером частиц 10^{-7} – 10^{-4} м

Выводы. Рассмотренный механизм проявления нового физического эффекта открывает реальную перспективу для создания высокоэффективных средств коллективной защиты от рентгеновского излучения с реализацией аномально высоких РЗ свойств на основе использования гидратирующихся фосфогипсовых и гипсовых матричных материалов.

Список литературы: 1. Булат, А. Ф. Исследование радиационно-защитных свойств резиновых матриц с «квантовыми ловушками» из полидисперсной смеси сложного окисла редкоземельных элементов [Текст]: міжвід. зб. наук. праць / А. Ф. Булат, В. А. Иванов, К. С. Голов // Геотехнічна механіка; Ін-т геотехнічної механіки ім. М. С. Полякова НАН України. – Дніпропетровськ, 2007. – Вип. 69. – С. 25–34. 2. Иванов, В. А. Явление аномального изменения интенсивности потока квантов проникающего излучения моно- и много-элементными средами: Диплом на открытие № 57 [Текст]: краткий справ. / В. А. Иванов, Г. К. Катрашук, С. Н. Конюхов и др. // Научные открытия ученых СНГ; под ред. Ф. К. Клименко, С. Н. Зыбайло. – Днепропетровск: Новая идеология, 2008. – С. 112–113. 3. ДСТУ Б В.2.7.-82-99 В'язучі гіпсові. Технічні умови. – Взамен ГОСТ 125-79, ГОСТ 23789-79, ГОСТ 26871-86. – Введ. 03.02.1999. – К.: Держбуд України, 1999. – 30 с. 4. ГОСТ 125-79 Вязущие гипсовые. Технические условия. – Взамен ГОСТ 125-70 и ГОСТ 5.1845-73. – Введ. 01.07.1980. – М.: Изд-во стандартов, 1980. – 12 с. 5. Инструкция по контролю защитных средств и материалов, используемых при рентгенодиагностике [Текст]. – М.: Минздравмедпром РФ, 1995. – 9 с. 6. Булат, А. Ф. Радиационно-защитные материалы нового технического уровня [Текст]: межвед. сб. науч. трудов / А. Ф. Булат, В. А. Иванов // Геотехнічна механіка; Інститут геотехнічної механіки ім. Н. С. Полякова НАН України. – Днепропетровск, 2006. – Вип. 64. – С. 3–14. 7. Запрудин, В. Ф. Радиационная безопасность зданий с учетом инновационных направлений в строительстве [Текст] / В. Ф. Запрудин, А. С. Беликов, А. В. Пилипенко и др.; под ред. д. т. н., проф. Беликова А. С. – Днепропетровск: Баланс-Клуб, 2009. – 349 с. 8. Перепелиця, В. Г. Апаратурні та методичні розробки методів радіаційного випромінювання для контролю зміни стану масиву при вуглевидобутку [Текст]: міжвед. сб. науч. трудов / В. Г. Перепелиця, А. О. Яланський, Т. А. Паламарчук // Геотехнічна механіка; Інститут геотехнічної механіки ім. Н. С. Полякова НАН України.

– Днепропетровск, 2007. – Вип. 73. – С. 98–107. 9. Гусева, И. А. The International Commission on Radiological Protection [Публикация 103 Международной Комиссии по радиационной защите (МКРЗ)] [Текст]: пер. с англ. / И. А. Гусева; под общей ред. М. Ф. Киселёва и Н. К. Шандалы. – М.: Изд. ООО ПКФ «Алана», 2009. – 344 с. 10. Арбузов, В. И. Основы радиационного оптического материаловедения [Текст]: учеб. пос. / В. И. Арбузов. – С.-Петербург: СПбГУИТМО, 2008. – 284 с.

Bibliography (transliterated): 1. Bulat, A. F., Ivanov, V. A., Holov, K. S. (2007). Yssledovanye radyatsyonno-zashchytnykh svoystv rezynovykh matryts s «kvantovymi lovushkami» yz polydispersnoi smesy slozhnogo okysla redkozemelnykh elementov. *Heotekhnichna mekhanika*, 69. In-t heotekhnichnoi mekhaniky im. M. S. Poliakova NAN Ukrainy. Dnipropetrovsk, 25–34. 2. Ivanov, V. A., Katrashuk, G. K., Konjuhov, S. N. i dr.; In: Klimenko, F. K., Zybajlo, S. N. (2008). Javlenie anomal'nogo izmenenija intensivnosti potoka kvantov pronikajushhogo izlucheniya mono- i mnogojelementnymi sredami: Diplom na otkrytie № 57. *Nauchnye otkrytija uchenyh SNG*. Dnepropetrovsk: Novaja ideologija, 112–113. 3. DSTU B V.2.7.-82-99 V'jazhuchi gipsovi. *Tekhnichni umovi*. (1999). Vzamen GOST 125-79, GOST 23789-79, GOST 26871-86. Vved. 03.02.1999. K.: Derzhbud Ukraini, 30. 4. GOST 125-79 Vjazhuviye gipsovyje. *Tekhnicheskie uslovija*. (1980). Vzamen GOST 125-70 i GOST 5.1845-73. Vved. 01.07.1980. M.: Izd-vo standartov, 12. 5. Instrukcija po kontrolju zavimnykh sredstv i materialov, ispol'zuemyh pri rentgenodiagnostike. (1995). M.: Minzdravmedprom RF, 9. 6. Bulat, A. F., Ivanov, V. A. (2006). Radiacionno-zashhitnye materialy novogo tehničeskogo urovnja. *Geotekhnicheskaja mehanika*, 64. Institut geotekhnicheskoi mekhaniky im. N. S. Poljakova NAN Ukrainy. Dnepropetrovsk, 3–14. 7. Zaprudin, V. F., Belikov, A. S., Pilipenko, A. V. i dr.; In: Belikova, A. S. (2009). *Radiacionnaja bezopasnost' zdaniy s uchetom innovacionnyh napravlenij v stroitel'stve*. Dnepropetrovsk: Balans-Klub, 349. 8. Perepelytsia, V. H., Yalanskyi, A. O., Palamarchuk, T. A. (2007). Aparaturni ta metodychni rozrobky metodiv radiatsiionoho vyprominiuвання dla kontroliu zminy stanu masivu pry vuhlevydobutku. *Heotekhnicheskaja mekhanika*, 73. Institut heotekhnicheskoi mekhaniky im. N. S. Poliakova NAN Ukrainy. Dnepropetrovsk, 98–107. 9. Huseva, Y. A. In: Kyseleva, M. F., Shandaly, N. K. (2009). *The International Commission on Radiological Protection [Publykatsiya 103 Mezhdunarodnoi Komysy po radyatsyonnoi zashchyte (MKRZ)]*. M.: Yzd. ООО PKF «Alana», 344. 10. Arbuзов, V. I. (2008). *Fundamentals of optical radiation-conducting material*. St. Petersburg: SPbGUITMO, 284.

Поступила (received) 16.10.2015

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Булат Анатолій Федорович – Академик НАН України, Директор інституту геотехнічної механіки ім. Н. С. Полякова НАН України, ул. Симферопольська, 2а, г. Дніпропетровськ, Україна, 49005; тел.: (0562) 47-37-21.

Булат Анатолій Федорович – Академік НАН України, Директор Інституту геотехнічної механіки ім. Н. С. Полякова НАН України, вул. Симферопольська, 2а, м. Дніпропетровськ, Україна, 49005; тел.: (0562) 47-37-21.

Bulat Anatoliy – Academic NAS of Ukraine, Director of Institute of Geotechnical Mechanics N. S. Polyakov NAS; str. Simferopol, 2a, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49005; tel.: (0562) 47-37-21, e-mail: vaivan@ukr.net.

Иванов Валерий Анатольевич – Кандидат технических наук, Институт геотехнической механики им. Н. С. Полякова НАН Украины, доцент, Отдел проблем разработки месторождений на больших глубинах, ул. Симферопольская, 2а, г. Днепропетровск, Украина, 49005; тел.: (0562) 47-37-21; e-mail: vaivan@ukr.net.

Іванов Валерій Анатолійович – Кандидат технічних наук, Інститут геотехнічної механіки ім. Н. С. Полякова НАН України, доцент, Відділ проблем розробки родовищ на великих глибинах; вул. Сімферопольська, 2а, м. Дніпропетровськ, Україна, 49005; тел.: (0562) 47-37-21; e-mail: vaivan@ukr.net.

Ivanov Valery – PhD, Institute of Geotechnical Mechanics N. S. Polyakov NAS, Associate Professor, Division problems mining at great depths, str. Simferopol, 2a, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49005; tel.: (0562) 47-37-21.

Голов Константин Сергеевич – Кандидат технических наук, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, Отдел проблем разработки месторождений на больших глубинах, ул. Симферопольская, 2а, г. Днепропетровск, Украина, 49005; тел.: (0562) 47-37-21; e-mail: klipsch@ukr.net.

Голов Костянтин Сергійович – Кандидат технічних наук, Інституту геотехнічної механіки ім. Н.С. Полякова НАН України, Відділ проблем розробки родовищ на великих глибинах, вул. Сімферопольська, 2а, м. Дніпропетровськ, Україна, 49005; тел.: (0562) 47-37-21; e-mail: klipsch@ukr.net.

Golov Konstantine – Candidate of Technical Sciences, Institute of Geotechnical Mechanics. N.S. Polyakov NAS, Division problems mining at great depths, str. Simferopol, 2a, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49005; tel.: (0562) 47-37-21.

Ткаченко Владимир Андреевич – доктор технических наук, профессор, Днепропетровский университет им. Альфреда Нобеля, ул. Набережная Ленина, 18, Днепропетровск, Украина, 49005; тел.: (056) 370-36-21.

Ткаченко Володимир Андрійович – доктор технічних наук, професор, Дніпропетровський університет ім. Альфреда Нобеля, вул. Набережна Леніна, 17, Дніпропетровськ, Україна, 49005; тел.: (056) 370-36-21.

Vladimir Tkachenko – doctor of technical sciences, professor, Alfred Nobel University Dnepropetrovsk, Naberezhna Lenina str., 18 Dnepropetrovsk, Ukraine, 49005; tel.: (056) 370-36-21; e-mail: abit@duep.edu.

Степаненков Евгений Иванович – Ведущий инженер, Институт геотехнической механики им. Н.С. Полякова НАН Украины, Отдел проблем разработки месторождений на больших глубинах, ул. Симферопольская, 2а, г. Днепропетровск, Украина, 49005, тел.: (0562) 47-37-21, e-mail: vaivan@ukr.net.

Степаненков Євгеній Іванович – Провідний інженер, Інституту геотехнічної механіки ім. Н. С. Полякова НАН України, Відділ проблем розробки родовищ на великих глибинах, вул. Сімферопольська, 2а, м. Дніпропетровськ, Україна, 49005; тел.: (0562) 47-37-21; e-mail: vaivan@ukr.net.

Stepanenko Evgeniy – Senior engineer, Institute of Geotechnical Mechanics. N. S. Polyakov NAS, Division problems mining at great depths str. Simferopol, 2a, Dnepropetrovsk, Ukraine, 49005; tel.: (0562) 47-37-21.

УДК 669.15:669.162.1

А. Н. ПАНЧЕНКО, Н. В. СУСЛО, А. С. ИВАНОВ

ПРИМЕНЕНИЕ ЭКОНОМНОЛЕГИРОВАННЫХ СТАЛЕЙ ДЛЯ ДЕТАЛЕЙ, РАБОТАЮЩИХ В УСЛОВИЯХ АБРАЗИВНОГО ИЗНОСА И ТЕРМОЦИКЛИЧЕСКИХ НАГРУЗОК

Изложены результаты исследования возможности замены дорогостоящих высоколегированных хромоникелевых сталей для деталей, работающих в сложных термоциклических условиях и действии абразивного износа экономнолегированными безникелевыми сталями. Предложено легирование этих сталей марганцем и азотом взамен никеля для получения однофазной аустенитной структуры. При определении необходимого количества азота, учтена его растворимость в экономнолегированной стали, которая составляет 0,37 %, что позволяет получить в предлагаемой стали аустенитную структуру.

Ключевые слова: экономнолегированная сталь, азот, легирование, термоциклические нагрузки, абразивный износ, окатыши, аустенитная структура.

Введение. Как показывает практика, для изготовления деталей, работающих в условиях высоких циклически изменяющихся температур с одновременным абразивным износом, используют высоколегированные хромоникелевые стали. В металлургическом производстве к таким процессам относятся, в первую очередь, обжиг окатышей и спекание агломерата на машинах конвейерного типа. Особенностью таких машин является применение для изготовления колосников, бортов тележек и других конструктивных узлов дорогостоящих сталей, содержащих от 2 до 12 % никеля и 22-28 % хрома. При этом стойкость деталей из этих сталей составляет 6 – 8 месяцев, что приводит к снижению технико-экономических показателей работы конвейерных машин. Поэтому, поиск альтернативных экономнолегированных сталей для работы в

сложных высокотемпературных условиях является актуальным.

Анализ литературных данных и постановка проблемы. Для повышения эксплуатационных свойств сталей, работающих в условиях термоциклических нагрузок и абразивного износа, рядом ученых [1-4] предложено их легирование азотом.

Для обеспечения коррозионной стойкости сталей азот вводится взамен никеля в соотношении 1:27 [4]. Одной из основных задач при производстве азотсодержащих коррозионностойких сталей является стабильное азотирование расплава. Процесс стабилизации азотирования расплава рассматривается на основе