

УДК 678.046.3

ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ НА РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНЫЕ ЖЕЛЕЗОСОДЕРЖАЩИЕ МАТЕРИАЛЫ**Матюхин П.В., Павленко З.В., Карнаухов А.В., Черкашина Н.И.***ФГБОУ ВПО «Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова»,
Белгород, e-mail: yrndo@mail.ru*

Авторами представлены результаты теоретических расчетов пробега быстрых электронов в радиационно-защитном железоксидном композите. Дана оценка защитных характеристик и экспериментальные результаты по изменению мощности дозы электронного излучения за слоями железосодержащих материалов с объемным электрическим зарядом. При обработке железоксидного композита в пучке быстрых электронов происходит восстановление магнетитовой фазы с резким увеличением содержания железа в Fe^{2+} -форме. В результате облучения высокоэнергетичными быстрыми электронами при дозе 2 МГр происходит наиболее интенсивная структурная перестройка атомов железа, приводящая к разупорядочению (аморфизации) кристаллов оксида железа. Магнетитовая фаза в железоксидном композите восстанавливается до структуры, близкой к воститу FeO с октаэдрической группировкой атомов железа с тенденцией на повышение симметрии зарядного окружения атомов железа при высоко-дозовом электронном облучении.

Ключевые слова: электронное облучение, композит, оксид железа, структура, свойства**IMPACT OF ELECTRONIC RADIATION ON RADIATION AND PROTECTIVE FERRIFEROUS MATERIALS****Matiukhin P.V., Pavlenko Z.V., Karnauhov A.A., Cherkashina N.I.***Belgorod State Technological University named after V.G. Shukhov, Belgorod, e-mail: yrndo@mail.ru*

Authors presented results of theoretical calculations of run of fast electrons in a radiation protective iron oxide composite. The assessment of protective characteristics and experimental results on change of power of a dose of electronic radiation behind layers of ferriferous materials with volume electric charge is given. When processing a the containing iron oxide composite in a bunch of fast electrons there is a restoration of a magnetit phase to sharp increase in the content of iron in Fe^{2+} -form. Radiation by high energy fast electrons at a dose of 2 MGY is resulted by the most intensive restructuring of atoms of iron resulting in disorder (amorphicity) of crystals of oxide of iron. The magnetit phase in a iron oxide composite is restored to the structure close to FEO vyustit to octahedral group of atoms of iron to a tendency on increase of symmetry of a charging environment of atoms of iron at high-dose electronic radiation.

Keywords: electronic radiation, composite, iron oxide, structure, properties

Особенностью радиационно-термических процессов является то, что взаимодействие электронного пучка, имеющего высокую мощность и плотность энергии, с веществом вызывает комплекс физических и химических процессов, приводящих к изменению структуры облучаемых материалов, их физических свойств и реакционной способности.

Электронный пучок дает возможность введение большой плотности энергии непосредственно в объем обрабатываемого материала, что приводит к его резкому нагреву, сопровождающемуся большим градиентом температур, и позволяет интенсифицировать протекание химических реакций. Кроме того, образование больших градиентов электрического поля, вызывает электрические пробой по границам зерен, что также может привести к разупрочнению материала по границам фаз [1–12].

Наличие избыточных электронов в веществе приводит к изменению волновой физики электронов кристалла, причем, температура электронного газа существенно

выше температуры кристалла, что приводит к повышению реакционной способности материала [13–21].

Взаимодействие электронов высокой энергии с веществом сопровождается появлением широкого спектра электромагнитного излучения: инфракрасного, видимого, ультрафиолетового, характеристического и тормозного рентгеновского. В результате комплексного воздействия электронов и электромагнитного излучения вещество переходит в возбужденное состояние, и его реакционная способность повышается [22–34].

Цель исследования

Оценка защитных характеристик железосодержащих материалов при воздействии высокоэнергетических пучков быстрых электронов.

Материалы и методы исследования

Моделирование процессов взаимодействия высокоэнергетических излучений проводили на радиационно-защитном железоксидном композите плотностью 4000 кг/м^3 , полученном на основе высокожелезистых магнетитовых концентратов КМА на

цементном вяжущем марки М500 с использованием пластифицирующих добавок методом виброуплотнения с последующей термовлажностной обработкой. Для оценки сравнительных параметров параллельно проводились исследования с материалами на основе стали.

Образцы железоксидных композитов и стали, спрессованные в форме дисков диаметром 50 мм и толщиной 1–20 мм, устанавливали на пути электронного пучка, перпендикулярно падающего на плоскую поверхность диска. За облучаемым образцом вплотную к его внешней поверхности закрепляли дозиметр, который был экранирован от попадания электронов, рассеянных в конструкции ускорителя.

Результаты исследования и их обсуждение

Экспериментальные исследования распределения мощности дозы $D(E)$ по глубине модифицированного магнетита и стали вдоль направления облучения показали, что при облучении электронами различной энергии одинаковая доза достигается на глубине, которая в приближении прямо пропорциональна энергии электронов в области 0,2–1,2 МэВ.

Наблюдается экстремальный характер распределения поглощенной дозы по толщине образца. Для пучка электронов с энергией 0,66–1,2 МэВ полоса максимума уширяется и охватывает более глубинные слои железоксидных материалов. Появление максимума связано с развитием процесса ионизации в массе композита, вызываемого падающими электронами и повышением плотности ионизации среды за счет обратного рассеяния вторичных электронов на больших глубинах.

Прохождение электронов через слой вещества в присутствии электрического поля рассчитано с использованием численного метода, описанного в. В этом методе принято, что путь электрона состоит из отрезков, определяемых расстоянием между двумя

последовательными актами упругого рассеяния при атомном столкновении. Вероятный процесс рассеяния электрона кулоновским полем ядра и атомных электронов вещества рассчитан по методу Монте-Карло. Результаты математических расчетов изменения коэффициентов отражения, поглощения электронов разной энергии и глубины их проникновения в модифицированном магнетите представлены в таблице.

Методом ядерного гамма-резонанса (ЯГР) установлено изменение валентно-координационного состояния атомов железа в железоксидном композите при его облучении в пучке быстрых электронов с энергией 6,2 МэВ при флюенсе 10^{18} эл/см².

При обработке железоксидного композита в пучке быстрых электронов происходит восстановление магнетитовой фазы с резким увеличением содержания железа в Fe²⁺-форме. Однако величина полученного изомерного сдвига 0,65–0,72 мм/с ниже, чем для чистой закиси железа, равной $\delta = 1,32$ мм/с. При облучении железоксидного композита в пучке быстрых электронов с поглощенной дозой 0,2–0,66 МГр, образующийся дуплет в спектре ЯГР соответствует ионам Fe²⁺ с сильно искаженной октаэдрической координацией с параметрами: $\delta = 1,34$ – $1,42$ мм/с и $\Delta = 2,59$ – $2,75$ мм/с. Наиболее ярко этот процесс протекает при дозе облучения, равной 0,66 МГр. По видимому, в данном случае связи железа с другими компонентами в композите имеют комплексный характер.

Что касается природы этих связей и электронной структуры атома железа, то надо иметь ввиду, что отсутствие магнитного расщепления в спектрах образцов железоксидного композита, подвергнутых высокому дозовому электронному облучению говорит о так называемом низком спиновом состоянии атома железа.

Расчетные параметры распределения электронов в поверхностных слоях железоксидного композита и стали

Материал	Энергия электронов, кэВ	Глубина концентрации максимальной дозы, мм	Коэффициенты			
			Отражения		Поглощения	
			по энергии	по частицам	по энергии	по частицам
Железо-оксидный композит	200	0,04	0,113	0,192	0,887	1,024
	660	0,30	0,037	0,086	0,963	1,244
	1200	0,80	0,019	0,048	0,981	1,404
Сталь	40	0,01	0,061	0,092	0,939	0,908
	200	0,02	0,138	0,226	0,862	0,962
	660	0,20	0,041	0,094	0,959	1,080
	1000	0,30	0,041	0,088	0,959	1,236
	1200	0,40	0,029	0,080	0,971	1,378

Увеличение дозы облучения до 2 МГр приводит к изменению параметров спектров ЯГР. Значения изомерных сдвигов $\delta = 0,95$ мм/с соответствует атомам Fe^{2+} с высоко спиновой электронной конфигурацией, а также указывает на значительную долю ковалентной составляющей. Величина квадратурного расщепления в композите, подвергнутом электронной обработке с дозой 2 МГр также снижается до $\Delta = 1,90$ мм/с, что указывает на повышение симметрии зарядного окружения атомов железа в октаэдрической позиции [$Fe^{2+}O_6$]. По-видимому, указанные структурные перестройки в магнетите могут быть вызваны, прежде всего, локализацией 3d-электронов атомов железа и деформацией решетки кристалла.

При высокой дозе (2 МГр) в спектрах ЯГР наблюдается уширение спектральных линий более чем в двое (до 0,72–1,08 мм/с) по сравнению с исходными образцами железоксидных композитов.

Заключение

В результате облучения высокоэнергетичными быстрыми электронами при дозе 2 МГр происходит наиболее интенсивная структурная перестройка атомов железа, приводящая к разупорядочению (аморфизации) кристаллов оксида железа. Магнетитовая фаза в железоксидном композите восстанавливается до структуры, близкой к вюститу FeO с октаэдрической группировкой атомов железа с тенденцией на повышение симметрии зарядного окружения атомов железа при высоко-дозовом электронном облучении.

Работа выполнена при поддержке проектной части Государственного задания Минобрнауки РФ, проект № 11.2034.2014/К и гранта РФФИ, проект № 14-41-08067.

Список литературы

1. Едаменко О.Д., Ястребинский Р.Н., Соколенко И.В., Ястребинская А.В. Нанонаполненные полимерные композиционные радиационно-защитные материалы авиационно-космического назначения // Современные проблемы науки и образования. – 2012. – № 6. – С. 128.
2. Матюхин П.В., Павленко В.И., Ястребинский Р.Н. Композиционный материал, стойкий к воздействию высокоэнергетических излучений // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2012. – № 2. – С. 25–27.
3. Матюхин П.В., Павленко В.И., Ястребинский Р.Н., Бондаренко Ю.М. Перспективы создания современных высококонструкционных радиационно-защитных металлокомпозитов // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2011. – № 2. – С. 27–29.
4. Матюхин П.В., Павленко В.И., Ястребинский Р.Н., Бондаренко Ю.М. Композиционный материал для радиационной защиты // Патент РФ №2470395, 20.12.2010.
5. Матюхин П.В., Ястребинский Р.Н. Исследование механизмов модифицирования поверхности природных

железородных минералов алкилсиликонатами // Известия высших учебных заведений. Серия: Химия и химическая технология. – 2005. – Т. 48. – № 4. – С. 140.

6. Огрель Л.Ю., Ястребинская А.В., Бондаренко Г.Н. Полимеризация эпоксидного связующего в присутствии добавки полиметилсилоксана // Строительные материалы. – 2005. – № 9. – С. 82–87.

7. Огрель Л.Ю., Ястребинская А.В. Структурообразование и свойства легированных эпоксидных композитов // Строительные материалы. – 2004. – № 8. – С. 48–49.

8. Павленко В.И., Ястребинский Р.Н. Полимерные радиационно-защитные композиты / Монография. – Белгород, БГТУ им. В.Г. Шухова, 2009. – 199 с.

9. Павленко В.И., Епифановский И.С., Ястребинский Р.Н., Куприева О.В. Термопластичные конструкционные композиционные материалы для радиационной защиты // Перспективные материалы. – 2010. – № 6. – С. 22–28.

10. Павленко В.И., Едаменко О.Д., Ястребинский Р.Н., Черкашина Н.И. Радиационно-защитный композиционный материал на основе полистирольной матрицы // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2011. – № 3. – С. 113–116.

11. Павленко В.И., Ястребинская А.В., Павленко З.В., Ястребинский Р.Н. Высокодисперсные органосвинцосилоксановые наполнители полимерных матриц // Известия высших учебных заведений. Северо-Кавказский регион. Серия: Технические науки. – 2010. – № 2. – С. 99–103.

12. Павленко В.И., Ястребинский Р.Н., Ястребинская А.В. Полимерные диэлектрические композиты с эффектом активной защиты // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2009. – № 3. – С. 62–66.

13. Павленко В.И., Липканский В.М., Ястребинский Р.Н. Расчеты процессов прохождения гамма-квантов через полимерный радиационно-защитный композит // Инженерно-физический журнал. – 2004. – Т. 77, № 1. – С. 12–15.

14. Павленко В.И., Епифановский И.С., Ястребинский Р.Н. Радиационно-защитный бетон для биологической защиты ядерных реакторов // Перспективные материалы. – 2006. – № 3. – С. 22.

15. Павленко В.И., Воронов Д.В., Ястребинский Р.Н. Радиационно-защитный тяжелый бетон на основе железорудного минерального сырья // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 2007. – № 4. – С. 40–42.

16. Павленко В.И., Ястребинский Р.Н., Смоликов А.А., Дегтярев С.В., Воронов Д.В. Радиационно-защитный бетон для биологической защиты ядерных реакторов // Перспективные материалы. – 2006. – № 2. – С. 47–50.

17. Павленко В.И., Ястребинский Р.Н., Воронов Д.В. Тяжелый бетон для защиты от ионизирующих излучений // Строительные материалы. – 2007. – № 8. – С. 48–49.

18. Павленко В.И., Ястребинский Р.Н., Воронов Д.В. Исследование тяжелого радиационно-защитного бетона после активации быстрыми нейтронами и гамма-излучением // Инженерно-физический журнал. – 2008. – Т. 81. – № 4. – С. 661–665.

19. Павленко В.И., Смоликов А.А., Ястребинский Р.Н., Дегтярев С.В., Панкратьев Ю.В., Орлов Ю.В. Радиационно-защитный бетон для АЭС с РБМК на основе железо-серпентинитовых композиций с цементным связующим // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2004. – № 8. – С. 66.

20. Павленко В.И., Куприева О.В., Черкашина Н.И., Ястребинский Р.Н. Дефектность кристаллов модифицированного гидроксида титана, подвергнутого термической обработке // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2015. – Т. 58, № 5. – С. 125–129.

21. Павленко В.И., Ястребинский Р.Н., Матюхин П.В., Ястребинская А.В., Куприева О.В., Самойлова Ю.М. Радиационно-защитные транспортные контейнеры отработавшего ядерного топлива на основе высоконаполненной полимерной матрицы и железорудного сырья КМА // В сборнике:

Региональная научно-техническая конференция по итогам конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого РФФИ и Правительством Белгородской области. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015. – С. 320–330.

22. Соколенко И.В., Ястребинский Р.Н., Крайний А.А., Матюхин П.В., Тарасов Д.Г. Моделирование прохождения высокоэнергетических электронов в высоконаполненном полимерном композите // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2013. – № 6. – С. 145–148.

23. Ястребинская А.В., Огрель Л.Ю. Разработка и применение композиционного материала на основе эпоксиановой смолы для строительных конструкций и теплоэнергетики // Современные наукоемкие технологии. – 2004. – № 2. – С. 173.

24. Ястребинская А.В., Павленко В.И., Ястребинский Р.Н. Коррозионностойкие полимеркомпозиты на основе эпоксидных и полиэфирных олигомеров для строительства // Перспективы развития строительного комплекса. – 2012. – Т. 1. – С. 243–247.

25. Ястребинский Р.Н., Павленко В.И., Ястребинская А.В., Матюхин П.В. Структурообразование металло-олигомерных водных дисперсий // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2012. – № 2. – С. 121–123.

26. Ястребинский Р.Н., Павленко В.И., Матюхин П.В., Воронов Д.В., Павленко З.В., Самойлова Ю.М. Конструкционные радиационно-защитные композиционные материалы на основе модифицированных железорудных пород КМА // В сборнике: Региональная научно-техническая конференция по итогам конкурса ориентированных фундаментальных исследований по междисциплинарным темам, проводимого РФФИ и Правительством Белгородской области. – Белгород: БГТУ им. В.Г. Шухова, 2015. – С. 491–499.

27. Ястребинская А.В., Павленко В.И., Матюхин П.В., Воронов Д.В. Механическая активация полимерных диэ-

лектрических композиционных материалов в непрерывном режиме // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2009. – № 3. – С. 74–77.

28. Ястребинский Р.Н., Павленко В.И., Матюхин П.В., Четвериков Н.А. Композиционный материал для защиты от гамма-излучения // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. – 2011. – № 3. – С. 17–20.

29. Ястребинская А.В. Модифицированный конструкционный стеклопластик на основе эпоксидных олигомеров для строительных изделий: Автореф. дис. канд. техн. наук. / Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова. Белгород. Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2004. – 19 с.

30. Ястребинский Р.Н., Павленко В.И., Бондаренко Г.Г., Ястребинская А.В., Черкашина Н.И. Модифицированные железооксидные системы – эффективные сорбенты радионуклидов // Перспективные материалы. – 2013. – № 5. – С. 39–43.

31. Ястребинский Р.Н., Бондаренко Г.Г., Павленко В.И. Транспортный упаковочный комплект для радиоактивных отходов на основе радиационно-защитной полимерной матрицы / Перспективные материалы. – 2015. – № 6. – С. 25–31.

32. Pavlenko V.I., Yastrebinskii R.N., Kuprieva O.V., Epifanovskii I.S. Thermoplastic constructional composite material for radiation protection // Inorganic Materials: Applied Research. – 2011. – Т. 2, № 2. – P. 136–141.

33. Pavlenko V.I., Yastrebinskii R.N., Lipkanskii V.M. Simulation of the processes of gamma-radiation transport through shielding containers for radioactive waste // Russian Physics Journal. – 2003. – Т. 46, № 10. – P. 1062–1065.

34. Pavlenko V.I., Yastrebinskij R.N., Degtyarev S.V. Modeling of processes of interaction of high-energy radiations with radiation-protective oxide of iron composites // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2005. – Т. 10, № 1–2. – P. 46–51.