

DOI: 10.12737/article_58e24bcd42faa5.10006763

*Алфимова Н.И., канд. техн. наук, доц.,
Пириева С.Ю., магистрант,
Федоренко А.В., магистрант
Шейченко М.С., канд. техн. наук*

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова

*Муниципальное бюджетное общеобразовательное учреждение
«Средняя общеобразовательная школа № 17»*

*Вишневская Я.Ю., канд. техн. наук, консультант
Департамент внутренней и кадровой политики Белгородской области*

СОВРЕМЕННЫЕ ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ РАДИАЦИОННО-ЗАЩИТНОГО МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЯ

alfimovan@mail.ru

В данной работе представлены данные результатов исследований и последних разработок в области создания радиационно-защитных и радиационно-стойких конструкционных и функциональных материалов в ядерной энергетике, а также в космической технике. Описаны основные требования, предъявляемым к материалам радиационной защиты, такие как: оптимальные массогабаритные показатели и способность ослаблять воздействие сочетанных потоков ионизирующих излучений. Представлены требования для защиты от нейтронного излучения. Перечислены материалы, используемые при проектировании биологической защиты ядерного реактора. Показано, что для замедления нейтронов в ядерных реакторах применяются гидриды металлов, т.к. в кристаллической решетке металлов можно растворить довольно большое количество атомов водорода. Наиболее часто в биологической защите применяют гидрид титана, а также композиционные материалы на его основе. Установлено, что важное значение имеют, прежде всего, такие материалы и композиции, которые обладают высокими радиационно-защитными, конструкционными свойствами и высокой радиационной стойкостью; данные материалы могут быть получены на основе металлических матриц, наполненных высокодисперсными оксидами тяжелых металлов. Перечислены способы для равномерного распределения частиц наполнителей в радиационно-защитных материалах. Одним из самых распространенных способов является модифицирование наполнителя для создания гидрофобной поверхности, введение 1–2 % модификатора значительно уменьшает агломерацию частиц наполнителя в полимерных композитах.

Ключевые слова: *радиация, композиционные материалы, нейтронное излучение, гамма-излучение, комическое воздействие, полимерные материалы, металлические материалы.*

Введение. Разработка конструкционных материалов эксплуатируемых в условиях облучения различными видами ионизирующего излучения представляет собой сложнейшую научно-техническую проблему, решение которой обеспечивает радиационное материаловедение. Радиационное материаловедение – наука, изучающая влияние облучения высокоэнергетическими частицами различной природы и энергии на функциональные свойства материалов. Анализ отечественной и зарубежной литературы свидетельствует об обширных исследованиях в области радиационного материаловедения, в частности множество работ посвящено разработке материалов, защищающих от ионизирующего излучения [1–3].

Основные методы радиационного материаловедения – реакторные (натурные) испытания, экспериментальная имитация облучения на ускорителях заряженных частиц различной природы и энергии, макро- и микроскопические

исследования структуры облученных материалов и испытания их механических свойств, размерной нестабильности, математическое моделирование [4].

К основным требованиям, предъявляемым к материалам радиационной защиты, относятся оптимальные массогабаритные показатели и способность ослаблять воздействие сочетанных потоков ионизирующих излучений. Например, поток нейтронов и сопутствующий поток гамма-квантов. Ослабление негативных эффектов, вызванных стационарными и импульсными, рассеянными и коллимированными потоками радиации обеспечивается за счет уменьшения интегральных потоков за защитой или за счет смещения максимума спектра излучения. Кроме того, материал защиты в ряде случаев должен быть устойчивым к значительным термоударным нагрузкам, возникающим в его объеме при термализации частиц поля излучения [5].

Целью настоящей работы является краткий обзор результатов исследований и последних разработок в области создания радиационно-защитных и радиационно-стойких конструкционных и функциональных материалов в ядерной энергетике, а также в космической технике.

Основная часть. Разработка радиационно-защитных материалов осуществляется в зависимости от типа излучения, от которого необходимо обезопасить биологический объект или высокочувствительную аппаратуру. В ядерной индустрии остро стоит проблема разработки материалов для биологической защиты ядерного реактора. Основное назначение биологической защиты реактора – замедление быстрых нейтронов и поглощение тепловых нейтронов, а также поглощение всех видов γ -излучения как в активной зоне реактора, его технологическом оборудовании, так и в самой защите, для обеспечения безопасных условий работы обслуживающего персонала и исследователей, занятых экспериментами на установке. При проектировании защиты от нейтронного излучения необходимо учитывать, что процесс поглощения эффективен для тепловых, медленных и резонансных нейтронов, поэтому быстрые нейтроны должны быть предварительно замедлены. Средняя потеря энергии при упругом рассеянии максимальна на легких ядрах (например, водороде) и минимальна на тяжелых. В связи с этим для защиты от быстрых нейтронов необходимы материалы, содержащие ядра легких элементов, чаще всего водорода. Однако низкая термостабильность применяемых водородсодержащих материалов, например воды, полимеров и высокая летучесть водорода резко ограничивают их применение для биологической защиты ядерных реакторов.

Для замедления нейтронов в ядерных реакторах применяются гидриды металлов, т.к. в кристаллической решетке металлов можно растворить довольно большое количество атомов водорода. Наиболее часто в биологической защите применяют гидрид титана, а также композиционные материалы на его основе [6–10].

Для обеспечения безопасности эксплуатации ядерных реакторов АЭС и ядерных энергетических установок (ЯЭУ) требуются материалы не только с высокой поглощающей способностью гамма- и нейтронного излучения, но и возможностью длительной эксплуатации при высоких радиационно-термических нагрузках без изменения физико-механических и радиационно-защитных свойств. Важное значение имеют, прежде всего, такие материалы и композиты, которые обладают высокими радиационно-защитными, конструкционными свойствами и высокой радиационной стойкостью.

Данные материалы могут быть получены на основе металлических матриц, наполненных высокодисперсными оксидами тяжелых металлов [11–15]. Авторами в работах [16–20] представлена технология производства радиационно-защитного композита на основе Al-матрицы, наполненной высокодисперсными оксидами железа и висмута, с достижением более высоких эксплуатационных характеристик по сравнению с известными мировыми и отечественными аналогами. Установлено, что материал обладает высокими прочностными характеристиками и способен выдерживать внешнюю нагрузку до 750 МПа при температуре эксплуатации до 530 °С.

Тем не менее, металлические материалы не всегда в состоянии блокировать все типы излучений, в частности выбросы нейтронов в космосе или в ядерных лабораториях. Кроме того, радиозащитное снаряжение из этих материалов является тяжелым и громоздким, что нежелательно для большинства применений. Полимерные материалы особенно интересны для создания материалов радиационной защиты по следующим причинам. Во-первых, они могут быть использованы в качестве конструкционных материалов, как металлы или сплавы, но при этом значительно легче. Во-вторых, они могут быть обработаны для достижения эффективного экранирования излучения для конкретной отрасли. Важным требованием, которому должны соответствовать полимерные композиции, предназначенные для изготовления конструкционных изделий для защиты от радиоактивных излучений, является высокая механическая прочность и стабильность свойств в широком интервале температур. Кроме того использование металлических материалов в космическом пространстве нежелательно из-за возникновения интенсивного тормозного излучения, усиливающегося при увеличении энергии падающих электронов, а для полимеров данная проблема незначительна [21].

Авторами [24] разработаны материалы радиационной защиты на основе полимерных матриц, наполненных нанодисперсными наполнителями. Из-за большого отношения площади поверхности к объему наночастицы обладают повышенной способностью поглощать частицы с высокой энергией, поэтому микро- или наноматериалы, диспергированные в композиционных материалах, могут быть использованы для разработки эффективной радиационной защиты.

В работе [25] установлено, что использование наноразмерных порошковых частиц радиационно-поглощающих материалов приводит к увеличению коэффициента поглощения нейтро-

нов в 1,5 раза и коэффициента рассеяния гамма-излучения на 30–40 %.

Однако, при введении нанодисперсных наполнителей в композит чаще всего происходит агрегация частиц, приводящая к неравномерному распределению наполнителя в материале и в конечном итоге к ухудшению его функциональных радиационно-защитных свойств. Для равномерного распределения частиц наполнителей существуют различные подходы. Одним из самых распространенных способов является модифицирование наполнителя для создания гидрофобной поверхности. Установлено, что введение 1–2 % модификатора значительно уменьшает агломерацию частиц наполнителя в полимерных композитах [26–29].

Самой сложной является разработка радиационно-защитных материалов для космических целей. Благодаря комплексу негативных условий в космосе (вакуумный ультрафиолет, атомарный кислород, радиационные пояса Земли) требуется специальный подход для разработки материалов, устойчивых к таким воздействиям длительное время [30–40].

Выводы: В данной работе представлен краткий обзор результатов исследований и последних разработок в области создания радиационно-защитных и радиационно-стойких конструкционных и функциональных материалов в ядерной энергетике, а также в космической технике.

Показано, что основными методами радиационного материаловедения являются – реакторные (натурные) испытания, экспериментальная имитация облучения на ускорителях заряженных частиц различной природы и энергии, макро- и микроскопические исследования структуры облученных материалов и испытания их механических свойств, размерной нестабильности, математическое моделирование.

Перечислены материалы, используемые при проектировании биологической защиты ядерного реактора. Рассказано о технологии производства радиационно-защитного композита на основе Al-матрицы, наполненной высокодисперсными оксидами железа и висмута, с достижением более высоких эксплуатационных характеристик по сравнению с известными мировыми и отечественными аналогами. Известно, что материал обладает высокими прочностными характеристиками и способен выдерживать внешнюю нагрузку до 750 МПа при температуре эксплуатации до 530 °С.

Описаны материалы радиационной защиты на основе полимерных матриц, наполненных нанодисперсными наполнителями. Из-за большого отношения площади поверхности к объему

наночастицы обладают повышенной способностью поглощать частицы с высокой энергией, поэтому микро- или наноматериалы, диспергированные в композиционных материалах, могут быть использованы для разработки эффективной радиационной защиты.

Установлено, что самой сложной является разработка радиационно-защитных материалов для космических целей. Благодаря комплексу негативных условий в космосе (вакуумный ультрафиолет, атомарный кислород, радиационные пояса Земли) требуется специальный подход для разработки материалов, устойчивых к таким воздействиям длительное время

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Матюхин П.В., Павленко В.И., Ястребинский Р.Н., Черкашина Н.И., Дороганов В.А., Евтушенко Е.И. Жаропрочный радиационно-защитный композиционный материал конструкционного назначения // Огнеупоры и техническая керамика. 2014. № 10. С. 32–36.
2. Чердынцев В.В., Горшенков М.В., Данилов В.Д., Калошкин С.Д., Гульбин В.Н. Металломатричные радиационно-защитные композиционные материалы на основе алюминия // Металловедение и термическая обработка металлов. 2013. № 1 (691). С. 14–18.
3. Gulbin V.N., Kolpakov N.S., Gorkavenko V.V., Cherdyntsev V.V. Development and research of radio and radiation-protective composite materials // Нанотехнологии: разработка, применение – XXI век. 2015. Т. 7. № 2. С. 17–25.
4. Неклюдов И.М., Воеводин В.Н. // Современный статус радиационного материаловедения 10-я Международная конференция «Взаимодействие излучений с твердым телом», 24–27 сентября 2013 г., Минск, Беларусь, С. 128–130.
5. Бойко В.И., Демянюк Д.Г., Долматов О.Ю., Исаченко Д.С., Шаманин И.В. Использование материалов, полученных в режиме технологического горения, в технике радиационной защиты: расчетное исследование защитных свойств // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. 2005. Т. 308. № 6. С. 80–83.
6. Ястребинская А.В., Матюхин П.В., Павленко З.В., Карнаухова А.В., Черкашина Н.И. Использование гидридсодержащих композитов для защиты ядерных реакторов от нейтронного излучения // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 12–6. С. 987–990.
7. Павленко В.И., Бондаренко Г.Г., Черкашина Н.И. Разработка нейтронно-защитных полимерных композитов на основе тонкомолотого

гидрида титана // Перспективные материалы, 2016. № 7. С. 16–21.

8. Павленко З.В., Черкашина Н.И. К вопросу использования численного моделирования в разработке радиационно-защитных материалов // В сборнике: Энерго- и ресурсосберегающие экологически чистые химико-технологические процессы защиты окружающей среды Международная научно-техническая конференция. 2015. С. 79–83.

9. Черкашина Н.И. Использование метода рентгенофазового анализа для изучения свойств модифицированного гидрида титана, подвергнутого термообработке // В сборнике: Энерго- и ресурсосберегающие экологически чистые химико-технологические процессы защиты окружающей среды Международная научно-техническая конференция. 2015. С. 117–120.

10. Черкашина Н.И., Демченко О.В. Повышение дисперсности гидрида титана // В сборнике: Энерго- и ресурсосберегающие экологически чистые химико-технологические процессы защиты окружающей среды Международная научно-техническая конференция. 2015. С. 120–124.

11. Черкашина Н.И., Матюхин П.В., Соколенко И.В. Нанотрубчатые наполнители с повышенной способностью поглощения гамма-излучения // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 12–7. С. 1187–1190.

12. Матюхин П.В., Павленко З.В., Карнаухов А.В., Черкашина Н.И. Воздействие электронного излучения на радиационно-защитные железосодержащие материалы // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 12–6. С. 970–973.

13. Гульбин В.Н. Металломатричные композиты, наполненные твердыми порошками // В сборнике: Новые материалы, перспективные технологии металлургии Сборник докладов симпозиума в рамках научно-технического конгресса «Международного Форума Двигателестроения» («МФД–2014»). ФГУП ВИАМ. 2014. С. 7.

14. Матюхин П.В., Павленко В.И., Ястребинский Р.Н., Дороганов В.А., Черкашина Н.И., Евтушенко Е.И. Термостойкие радиационно-защитные композиционные материалы, эксплуатируемые при высоких температурах // Огнеупоры и техническая керамика. 2014. № 7–8. С. 23–25.

15. Самойлова Ю.М., Черкашина Н.И. Радиационно-защитный композит на основе Al-матрицы, наполненной оксидом железа // В сборнике: Энерго- и ресурсосберегающие экологически чистые химико-технологические про-

цессы защиты окружающей среды Международная научно-техническая конференция. 2015. С. 97–101.

16. Матюхин П.В. Неорганический радиационно-защитный металлокомпозиционный материал строительного назначения // Известия высших учебных заведений. Строительство. 2007. № 9. С. 35–39.

17. Матюхин П.В. Термостойкие полимерные композиты для нейтронной и гамма-защиты // Международный научно-исследовательский журнал. 2014. № 9 (28). С. 39–40.

18. Matyukhin P.V. Theoretical preconditions of new kinds of nuclear protective metal composite materials development based on ferric and bismuth oxides capsulated into metallic aluminum matrix // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2011. № 2. С. 42.

19. Матюхин П.В. Нанотрубчатые наполнители радиационно-защитных композиционных материалов // Международный научно-исследовательский журнал. 2014. № 6–1 (25). С. 59–60.

20. Матюхин П.В. Металлобетонный композит на основе модифицированного высокодисперсного оксида железа и металлического алюминия: дис. на соискание ученой степени канд. техн. Наук. Белгород, 2004.

21. Черкашина Н.И., Сухорослова В.В. Разработка высоконаполненного полимерного композита, наполненного тяжелыми элементами // В сборнике: Энерго- и ресурсосберегающие экологически чистые химико-технологические процессы защиты окружающей среды Международная научно-техническая конференция. 2015. С. 124–128.

22. Павленко В.И., Черкашина Н.И., Иващенко Д.А. Исследование механизмов синтеза и модифицирования нанокристаллического наполнителя полимерных матриц // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 10. С. 185–190.

23. Ястребинская А.В., Черкашина Н.И., Матюхин П.В. Радиационно-защитные нанонаполненные полимеры // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 12–7. С. 1191–1194.

24. Matyukhin P.V., Yastrebinskii R.N., Pavlenko V.I., Cherkashina N.I. The high-energy radiation effect on the modified iron-containing composite material // World Applied Sciences Journal. 2013. № 25. С. 1343.

25. Гульбин В.Н. Разработка композиционных материалов, модифицированных нанопорошками, для радиационной защиты в атомной

энергетике // Ядерная физика и инжиниринг. 2011. Т. 2. № 3. С. 272–286.

26. Павленко В.И., Черкашина Н.И., Павленко З.В. Синтез нанодисперсного наполнителя для полимерных композиционных материалов терморегулирующего назначения // Нанотехнологии в строительстве: научный интернет-журнал. 2016. Том 8. № 5. С. 21–37.

27. Матюхин П.В., Ястребинская А.В., Черкашина Н.И., Коба В.В. Поглощающие нейтроны нанотрубчатые наполнители высокотемпературных полимеров // Успехи современного естествознания. 2015. № 10. С. 36–39.

28. Matyukhin P.V., Pavlenko V.I., Yastrebinsky R.N., Cherkashina N.I. The high-energy radiation effect on the modified iron-containing composite material // Middle East Journal of Scientific Research. 2013. Т. 17. № 9. С. 1343–1349.

29. Yastrebinsky R.N., Pavlenko V.I., Matyukhin P.V., Cherkashina N.I., Kuprieva O.V. Modifying the surface of iron-oxide minerals with organic and inorganic modifiers // Middle East Journal of Scientific Research. 2013. Т. 18. № 10. С. 1455–1462.

30. Черкашина Н.И., Прут Э.В., Матюхин П.В. Влияние высоких давлений прессования при синтезе на изменение физико-механических характеристик полимерных композитов на основе термопластичных эластомеров // Вестник Белгородского государственного технологического университета им. В.Г. Шухова. 2016. № 12. С. 155–159.

31. Черкашина Н.И., Матюхин П.В., Ястребинский Р.Н., Павленко З.В., Демченко О.В. Использование кремнийсодержащих структур для получения композитов с повышенной устойчивостью к атомарному кислороду // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 12–6. С. 991–994.

32. Pavlenko V.I., Cherkashina N.I., Yastrebinskaya A.V., Matyukhin P.V., Kuprieva O.V. Using the high-dispersity $[\alpha]\text{-Al}_2\text{O}_3$ as a filler for polymer matrices, resistant against the atomic oxygen // World Applied Sciences Journal. 2013. Т. 25. № 12. С. 1740–1746.

33. Черкашина Н.И., Павленко В.И., Едаменко А.С., Матюхин П.В. Исследование влияния вакуумного ультрафиолета на морфологию поверхности наноуплотненных полимерных композиционных материалов в условиях при-

ближенных к условиям околоземного космического пространства // Современные проблемы науки и образования. 2012. № 6. С. 129.

34. Pavlenko V.I., Edamenko O.D., Cherkashina N.I., Kuprieva O.V., Noskov A.V. Study of the attenuation coefficients of photon and neutron beams passing through titanium hydride // Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2015. Т. 9. № 3. С. 546–549.

35. Pavlenko V.I., Nartsev V.M., Kuprieva O.V., Pavlenko Z.V., Cherkashina N.I. Study of thermal effects on the structure of thin-film borosilicate coatings by ellipsometry, and x-ray diffraction // Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques. 2015. Т. 9. № 5. С. 1022–1025.

36. Черкашина Н.И. Воздействие вакуумного ультрафиолета на полимерные композиты терморегулирующего назначения // Международный научно-исследовательский журнал, 2016. № 7–4 (49). С. 72–77.

37. Черкашина Н.И., Соколенко И.В. Разработка стекломатрицы с повышенными механическими характеристиками // В сборнике: Энерго- и ресурсосберегающие экологически чистые химико-технологические процессы защиты окружающей среды Международная научно-техническая конференция. 2015. С. 267–271.

38. Черкашина Н.И. Устойчивость терморегулирующих покрытий на основе полимерных композитов к микрометеоритному воздействию // Международный научно-исследовательский журнал, 2016. № 6–2 (48). С. 165–170.

39. Черник В.Н., Новиков Л.С., Бондаренко Г.Г., Гайдар А.И., Смирнова Т.Н. Исследование эрозии полимерных волокон в потоках кислородной плазмы // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2010. Т. 74. № 2. С. 289–292.

40. Джур Е.А., Санин А.Ф., Божко С.А., Андрианов А.Ю., Белоус В.А., Рыбка А.В., Захарченко А.А., Борисенко В.Н., Зиновьев А.М., Кузнецов А.П., Плиса Ю.В. Композиционный материал для защиты радиоэлектронной аппаратуры космических аппаратов от ионизирующего излучения // Вестник Сибирского государственного аэрокосмического университета им. академика М.Ф. Решетнева. 2013. № 6 (52). С. 126–131.

Alfimova N.I., Pirieva S.Yu., Fedorenko A.V., Sachenko M.S., Vishnevskaya J.Yu.

MODERN TRENDS IN THE DEVELOPMENT OF RADIATION-PROTECTIVE MATERIALS SCIENCE

This work presents the results of researches and latest developments in the field of creation of radiation-protective and radiation-resistant functional and structural materials in nuclear industry and in space technology. Describes the basic requirements for radiation protection, such as: optimal weight and dimensions, and the ability to lessen the impact of the combined flows of ionizing radiation. The requirements for protec-

tion against neutron radiation. Lists the materials used in the design of biological protection of nuclear reactor. It is shown that to slow down neutrons in nuclear reactors are used metal hydrides, since in the crystal lattice of metals can be dissolved quite a large number of hydrogen atoms. Most often in the biological protection used titanium hydride and composite materials on its basis. Found that are important, first of all, such materials and composites that have high radiation shielding, structural properties and high radiation resistance; these materials can be obtained on the basis of the metal matrix filled with highly dispersed oxides of heavy metals. Lists the methods for uniform distribution of filler particles in the radiation-protective materials. One of the most common is the modification of filler to create a hydrophobic surface, the introduction of 1–2 % modifier reduces the agglomeration of filler particles in polymer composites.

Key words: radiation, composite materials, neutron radiation, gamma radiation, comic impact, polymeric materials, metallic materials.

Алфимова Наталия Ивановна, кандидат технических наук, доцент кафедры строительного материаловедения изделий и конструкций.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

E-mail:alfimovan@mail.ru

Пириева Севда Юнисовна, магистрант кафедры строительства и городского хозяйства.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Федоренко Анна Викторовна, магистрант кафедры строительного материаловедения изделий и конструкций.

Белгородский государственный технологический университет им. В.Г. Шухова.

Адрес: Россия, 308012, Белгород, ул. Костюкова, д. 46.

Шейченко Михайл Сергеевич, кандидат технических наук

Муниципальное бюджетное общеобразовательное учреждение «Средняя общеобразовательная школа № 17».

Адрес: 308010 г. Белгород, ул. Крупской, д. 9.

Вишневская Яна Юрьевна, кандидат технических наук, консультант отдела высшего образования и науки.

Департамент внутренней и кадровой политики Белгородской области.

Адрес: Россия, 308005, Соборная площадь, 4