

**Н.А. АЗАРЕНКОВ**, докт. физ.-мат. наук, член-корреспондент НАНУ,  
ХНУ им. В.Н. Каразина,

**В.Н. БЕРЕСНЕВ**, докт. физ.-мат. наук, ХНУ им. В.Н. Каразина,

**В.Н. ВОЕВОДИН**, докт. физ.-мат. наук, ННЦ «ХФТИ» НАНУ

**В.Г. КИРИЧЕНКО**, канд. физ.-мат. наук, ХНУ им. В.Н. Каразина,

**Г.П. КОВТУН**, докт. физ.-мат. наук, ННЦ «ХФТИ» НАНУ

**С.В. ЛИТОВЧЕНКО**, канд. техн. наук, ХНУ им. В.Н. Каразина,

**В.А. ЧИШКАЛА**, канд. техн. наук, ХНУ им. В.Н. Каразина,

## **НАНОСТРУКТУРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И НАНОТЕХНОЛОГИИ В АТОМНОЙ ТЕХНИКЕ**

Представлені результати дослідження, розробки та використання наноматеріалів в ядерній енергетиці та техніці. Наведено основні властивості наноструктурних матеріалів. Розглянуто перспективи створення наноструктурних матеріалів і покриттів конструкційних елементів АЕС з покращеними механічними властивостями (твердість та міцність), підвищеними корозійною та радіаційною стійкістю. Сформульовано основні проблеми, що виникають при розробці дисперсійно-зміцнених оксидами сталей, створенні на металічній чи керамічній основі поруватих і каркасних структур, фільтрів та мембран, розробці наноструктурних надпровідників, створенні нанокомпозитних покриттів та магнітних матеріалів.

The review of results of the investigations, researchers and using of nanomaterials in nuclear energetic and engineering are presented. The basic properties of nanostructure materials are adduced. The perspectives of creating of nanostructure materials and coating for constructive elements AES with increasing hardness and strength, increasing corrosion and radiation stability are considered. The principal problems which arise under under elaboration of strengthening oxide disperse steels and porous ceramics, frames, filters and membranes, elaboration of nanostructure superconductors and magnetic nanocomposites, nanocomposite coatings are considered.

В ядерной энергетике и ядерной промышленности очень важна проблема модернизации топливных и конструкционных материалов для активной зоны ядерных реакторов [1, 2]. Нанотехнологии в последнее время стали применяться практически во всех сферах новейших технологий и по сути дела превратились в междисциплинарную область науки и техники. В атомной отрасли нанотехнологии применялись при создании топливных и конструкционных материалов на основе качественного изменения свойств материалов при переходе в нанометрический диапазон размеров [3, 4]. Субмикронные и нанокристаллические металлические и керамические материалы широ-

ко используются в настоящее время в качестве конструктивных элементов и функциональных слоев в современных микроэлектронных устройствах, деталях авиакосмической техники, а также в качестве износостойких покрытий в обрабатывающей промышленности [5].

Области применения нанотехнологий в атомной энергетике охватывают практически весь круг проблем ядерного топливного цикла:

- Создание нового ядерного топлива с нанодобавками, для активной зоны АЭС. Создание нового класса уран-плутониевого оксидного (МОКС) топлива. Освоение торий-уранового цикла.

- Создание нанодисперсных материалов конструкционного и функционального назначения. Дисперсно-упрочненные оксидами (ДУО) ферритно-мартенситные стали.

- Исследование и разработка материалов для быстрых реакторов и будущих реакторов 4-ого поколения. Исследование радиационно-индуцированной микроструктуры. Микроструктурные предсказания возможности продления срока эксплуатации реакторов: корпуса, внутрикорпусные стали.

- Наномембраны и нанофильтры для технологий обращения с ОЯТ

- Разработка метрологического обеспечения использования наноматериалов для ядерных установок.

- Нанодатчики и наносенсоры для АСУ ТП АЭС. Повышение тактико-технических характеристик систем безопасности и охраны АЭС

- Наноструктурированные материалы blankets и стенки ТЯР.

- Наноструктурные сверхпроводники.

- Нанокompозитные материалы и покрытия.

**Ядерное топливо с нанометрическими структурами.** Энергетическая стратегия предусматривает постепенный ввод новых ядерных энерготехнологий на быстрых нейтронах с замыканием ядерного топливного цикла с МОКС-топливом. Из всех типов быстрых реакторов промышленно освоенными на сегодня являются реакторы с натриевым теплоносителем. Одним из условий повышения эффективности работы АЭС является увеличение глубины выгорания ядерного топлива. Для обеспечения глубоких выгораний топлива необходимо создание крупнокристаллических структур ядерного топлива с контролируемой пористостью.

**Дисперсно-упрочненные оксидами ферритно-мартенситные стали.** Увеличение эффективности работы и срока службы перспективных реакторов на быстрых нейтронах требует повышения степени выгорания топлива до

18 – 20 % без снижения параметров теплоносителя. При решении этой проблемы возникает необходимость создания нового класса радиационно-стойких металлических материалов, упрочненных наночастицами оксидов металлов. Эти материалы должны удовлетворять таким требованиям:

- иметь низкую ползучесть при температурах до 970 К и стабильность размеров, долговечность ~ 9 лет;
- обладать высокой радиационной стойкостью к нейтронному облучению. Доза облучения: ~ 250 сна;
- обеспечить радиационную стойкость материала оболочки при повышенных характеристиках жаропрочности;
- иметь высокие механические свойства при 970 К – предел прочности > 300 МПа, предел длительной прочности > 120 МПа;
- обладать высоким сопротивлением коррозии и химическую совместимость с топливом.

Создание и использование нового класса ферритно-мартенситных радиационно-стойких сталей, упрочненных частицами оксидов нанометрового размера (ДУО-стали), соответствует глобальной задаче создания конструкционных материалов, упрочненных высокодисперсными неметаллическими частицами (наночастицами). Впечатляющие характеристики ДУО-сталей как по механическим свойствам, так и по радиационной стойкости позволяют планировать использование подобных сталей в термоядерной энергетике в качестве материала первой стенки и blankets термоядерного реактора.

**Нанокорксы и пористая нанокерамика.** Важным направлением в нанотехнологиях является создание из различных функциональных материалов пористых нанокорксов с толщиной стенки отдельных пор 10 – 100 нм и размером ячейки до 1000 нм, например нанокоркса из бериллия с низкой плотностью.

**Наномембраны и нанофильтры.** Металлические объемные нанофильтры перспективны для использования в системах водоподготовки и очистки теплоносителя реакторов АЭС. Наномембраны, нанофильтры, нанокатализаторы используются в технологиях обращения с ОЯТ и РАО, в системах водоподготовки и очистки теплоносителей, дожигания радиолитического водорода, тонкой очистки воздуха и технологических газов. Опытно-промышленные установки с использованием нанофильтрации используются для переработки жидких радиоактивных отходов, очистки газов от радиоактивных аэрозолей.

**Сверхпроводящие наноструктурированные материалы.** Создание сверхпроводящих материалов в виде наноструктурных сверхпроводников является примером разработки, изначальной целью которой явилось получение объемных наноструктурированных материалов. В результате перехода к нанометрическим структурам удалось в несколько раз увеличить токонесущую способность сверхпроводников, что позволило создать мощные магнитные системы и экономить при этом до 30 % электроэнергии.

**Магнитные нанокompозиты.** В настоящее время производители проявляют повышенный интерес к нанокompозитным магнитам. Прежде всего, новые магнитные материалы используются в малогабаритных, сверхскоростных электродвигателях и генераторах для авиакосмической, автомобильной и приборостроительной отраслей. Так, на основе эффекта Виганда были созданы магнитные микрокомпозитные материалы на основе сплавов Co – Fe – Nb и Fe – Ni. Разработана технология получения нанокристаллических магнитных материалов методом центробежного распыления расплава. Нанокристаллические магнитные материалы превосходят известные ферриты по магнитной энергии в 6 – 8 раз.

**Наноматериалы в системах безопасности.** Достижения в области наноматериалов и нанотехнологий открывают новые возможности для повышения характеристик систем безопасности, востребованных рынком. Наиболее перспективны такие направления использования нанотехнологий в системах безопасности: нанодатчики на различных физических принципах: туннельные датчики давления; интеллектуальные датчики «умная пыль» для охраны границ и периметров объектов; датчики обнаружения пожаров.

**Нанокompозитные покрытия.** Многослойные композиционные покрытия успешно применяются для улучшения и расширения функциональных возможностей многих материалов. Переход на наномасштаб отдельных элементов таких покрытий позволил выйти на принципиально новый уровень эксплуатационных свойств. Примером являются полученные и исследованные новые типы нанокompозитных покрытий на основе систем TiCrN / Ni – Cr – Fe – Si – B и TiAlN / Ni – Cr – Fe – Si – B, полученных путем комбинации плазменно-детонационного, вакуумно-дугового и магнетронного методов осаждения. В результате проведенных исследований элементного и фазового состава поверхности гибридных покрытий, а также измерений твердости и коррозионной стойкости в агрессивных средах, обнаружено значительное повышение физико-механических и химических свойств поверх-

ности при нанесении покрытий комбинированными методами.

В полученных комбинированных покрытиях формируются мелкодисперсные фазы: в твердом растворе TiCrN размер зерен  $2,8 \div 4$  нм, а средний размер зерен для фазы TiAlN  $18 \div 24$  нм. Нанокompозитные покрытия на основе Ti – Cr – N и Ti – Al – N обладают высокими твердостью и модулем упругости. Обнаружено повышение твердости комбинированных покрытий при достаточно высоком значении модуля упругости:  $H = 32 \pm 1,1$  ГПа при  $E = 320 \pm 20$  ГПа для покрытия на основе TiCrN;  $H = 20,8 \pm 1,8$  ГПа при  $E = 342 \pm 18$  ГПа для покрытия на основе TiAlN.

Полученные гибридные покрытия имеют высокую коррозионную стойкость к кислотным и щелочным средам.

Коррозионная стойкость TiAlN / Ni – Cr – В – Si – Fe в солевом растворе резко возрастает (на три порядка выше, чем стойкость подложки из нержавеющей стали и на 2 порядка, чем для TiCrN покрытия).

Нанесение тонких нитридных покрытий TiCrN и TiAlN на порошковый подслоя приводит к значительному уменьшению изнашивания поверхности композитного покрытия при трении цилиндра по плоскости в техническом вазелине за счет фазовых преобразований.

**Список литературы:** 1. Развитие атомной энергетики Росси и Украины – фактор устойчивого межгосударственного сотрудничества // Материалы совместного совещания-семинара РАН и НАНУ: 21-23 октября 2008 г., ЛОК «Колонтаево» (г. Электросталь). – М.: Наука, 2009. – 357 с. 2. Воеводин В.Н. Эволюция структурного состояния и радиационная стойкость конструкционных материалов / В.Н. Воеводин, И.М. Неклюдов. – К.: «Наукова думка», 2006. – 376 с. 3. Путилов А.В. Разработки ФГУП ВНИИНМ в области нанотехнологий и наноматериалов для атомной отрасли / А.В. Путилов // Российские нанотехнологии. – 2007. – Т. 2, № 9 – 10. – С. 6 – 11. 4. Азаренков Н.А. Нанотехнологии и наноматериалы в атомной энергетике / [Н.А. Азаренков, Г.П. Ковтун, С.В. Литовченко и др.] // Фізико-хімічні основи формування і модифікації мікро- та наноструктур, FMMN'2009»: міжнародна наукова конференція, 2009: збірник наукових праць. – Х.: НФТЦ МОН та НАН України, 2009. – С. 152 – 157. 5. Погребняк А.Д. Структуры и свойства твердых и сверхтвердых нанокompозитных покрытий / [А.Д. Погребняк, А.П. Шпак, Н.А. Азаренков, В.М. Береснев] // УФН. – 2009. – Т. 179, № 1. – С. 36 – 64.

Поступила в редколлегию 20.09.10