

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗРАБОТКИ КОРРОЗИОННО-УСТОЙЧИВЫХ НАНОСТРУКТУРНЫХ И СУБМИКРОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ МАТЕРИАЛОВ НА БАЗЕ ТИТАНОВЫХ И ЦИРКОНИЕВЫХ СПЛАВОВ, НЕРЖАВЕЮЩЕЙ СТАЛИ, С МОДИФИЦИРОВАННОЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

С.И. Кудряшов, ст. науч. сотр. Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, канд. физ.-мат. наук, доц.

Ю.Р. Колобов, рук. науч.-обр. и инновац. центра «Наноструктурные материалы и нанотехнологии» Белгородского государственного национального исследовательского ун-та, д-р физ.-мат. наук, проф.

М.Б. Иванов, зав. лаб. биоматериалов науч.-образ. и инновац. центра «Наноструктурные материалы и нанотехнологии» Белгородского государственного национального исследовательского ун-та, канд. физ.-мат. наук

Е.В. Голосов, зав. НИЛ перспективных материалов кафедры наноматериалов и нанотехнологий НИУ «БелГУ» на базе научного центра РАН в Черноголовке Белгородского государственного национального исследовательского ун-та, канд. физ.-мат. наук

Рассмотрены актуальность и перспективы разработки устойчивых к проявлению водородной хрупкости наноструктурных и субмикроструктурных титановых сплавов, нержавеющей стали и циркониевых сплавов, в том числе с модифицированной поверхностью и повышенными коррозионно-механическими свойствами.

Ключевые слова: субмикроструктурные материалы, наноструктурные материалы, прочность, пластичность, интенсивная пластическая деформация.

Актуальность. Обеспечение надежной работы теплообменных труб (ТОТ) парогенераторов (ПГ) является важнейшей задачей для атомных электростанций (АЭС) различного типа во всем мире. Основным механизмом повреждения теплообменных труб АЭС с водородным энергетическим реактором является коррозионное растрескивание (КР) [1]. КР происходит при наличии растягивающих напряжений в среде, содержащей активаторы (хлор и другие ионы группы галогенов) и окислитель (кислород). В мире опубликовано более 70 тыс. работ и проводится большой комплекс научно-исследовательских работ по решению проблемы КР. Однако с момента возникновения этой проблемы она так полностью и не решена. Многочисленные остановки энергоблоков на поиск и герметизацию поврежденных трубок причиняют экономический ущерб, размеры которого сложно переоценить. В результате в атомной энергетике, как в России, так и за рубежом, в связи с существованием проблемы КР теплообменных труб проводится замена парогенераторов. Плановая замена одного парогенератора обходится в среднем в 50 млн долл., не считая убытков от простоя генератора. Согласно отчету МАГАТЭ «Heavy Component Replacement in Nuclear Power Plants: Experience and Guidelines» за период с 1979 по 2005 г. замена парогенераторов была произведена на 83 энергоблоках с PWR в различных странах. К 2010 г. на АЭС США осталось лишь 5 блоков PWR с не замененными парогенераторами. Похожая ситуация и в других странах, например, во Франции к 2011 г. ПГ были заменены на 20 блоках из 58, в том же году было объявлено о замене еще 44 ПГ. Кроме того, проблемы с парогенераторами могут приводить и к более серьезным последствиям: в США с 1989 по 1998 г. было шесть случаев, когда массовые дефекты теплообменных трубок парогенераторов стали основной причиной полного закрытия энергоблоков.

Схожая проблема возникает при эксплуатации судовых атомных энергетических установок. В этом случае зафиксированы не единственные случаи аварийных остановок реакторов

из-за выхода из строя парогенераторов. Причиной разгерметизации ТОТ является горячесолевая коррозия титановых сплавов.

Немаловажной проблемой для титановых и циркониевых сплавов остается водородная хрупкость, которая, тем не менее, проявляется в разной степени для титановых сплавов в субмикроструктурном (СМК) или наноструктурном (НС) состоянии. Первые данные о положительном влиянии СМК-структуры на чувствительность титановых сплавов к водороду появились в последние годы [2]. На примере титанового сплава ВТ6 показано, что формирование СМК-структуры приводит к повышению сопротивления замедленному водородному разрушению материала. На примере титана марки ВТ1-0 показано, что СМК-структура благоприятно влияет на ударную вязкость металла при высоких содержаниях водорода. Кроме того, титан с СМК-структурой имеет более высокую коррозионную стойкость, в том числе меньшую склонность к питтингообразованию.

В исследованиях последних лет обнаружено, что формирование наноразмерной структуры (НС) в титановых сплавах ПТЗВ и ПТ7М приводит к увеличению коррозионной стойкости в условиях горячесолевой коррозии в 4–6 раз [3]. Аналогичный эффект может наблюдаться в аустенитных нержавеющей стали и циркониевых сплавах (Э125), а именно, значительное увеличение инкубационного периода до появления трещин при коррозионно-механическом воздействии или даже полное подавление процесса КР.

Таким образом, в настоящее время в ряде исследований обоснована перспективность формирования НС или субмикроструктурной структуры (СМК) для кардинального улучшения механических свойств металлов и сплавов, в том числе для повышения таких важных для практического использования этих материалов характеристик, как пределы текучести и прочности при сохранении высокой пластичности, твердость, сопротивление усталостному разрушению [4, 5]. При этом накопленный за последние два десятилетия объем исследований в области разработки наноструктурированных металлов и сплавов технического назначения и модификации их поверхности с целью кардинального улучшения их свойств носит преимущественно характер фундаментальных и поисковых исследований, позволяющих выявить целый ряд преимуществ таких материалов перед обычными крупнозернистыми металлами и сплавами промышленного производства [2–19].

В данном контексте, представляется целесообразной разработка новых СМК- и НС-сплавов на основе титана и циркония, а также нержавеющей стали. Инновационным элементом исследований будет отработка оптимальных для будущего промышленного использования способов модификации поверхностей изделий из указанных материалов с использованием фемтосекундного лазерного облучения и микродугового оксидирования для решения задачи улучшения механических свойств и коррозионной стойкости, с том числе в водородсодержащих средах. Использование таких материалов в атомной промышленности, судостроении и авиастроении должно дать ощутимые положительные экономический, социальный и экологический эффекты.

Состояние проблемы. В настоящее время одним из самых технологически эффективных путей получения СМК- и НС-материалов в больших объемах, по сравнению методами электроосаждения, кристаллизации из аморфного состояния, консолидирования порошков и др., считается метод воздействия пластической деформацией, или так называемой интенсивной пластической деформацией («severe plastic deformation»). Тематика наноматериалов, получаемых воздействием пластической деформацией, которая начала формироваться около 20 лет назад, находится в первой тройке материаловедческих направлений в мире, имеющих наиболее высокий индекс цитируемости, ей посвящены несколько престижных национальных и международных конференций [20–26]. К настоящему времени по данному направлению опубликовано большое число работ (см. предыдущие обзоры [27–30]).

На рис. 1 приведен график, демонстрирующий число публикаций по годам по тематике «получение наноструктурных материалов методом интенсивной пластической деформации». Из данного графика видно, что наибольшую популярность данное направление – как наибо-

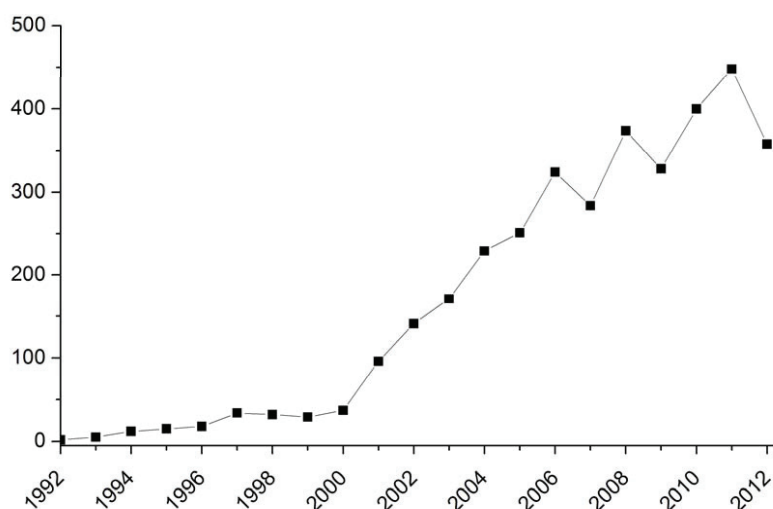


Рис. 1. Число публикаций по тематике, посвященной НС-материалам, полученным воздействием интенсивной пластической деформации, за период с 1992 по 2012 г.

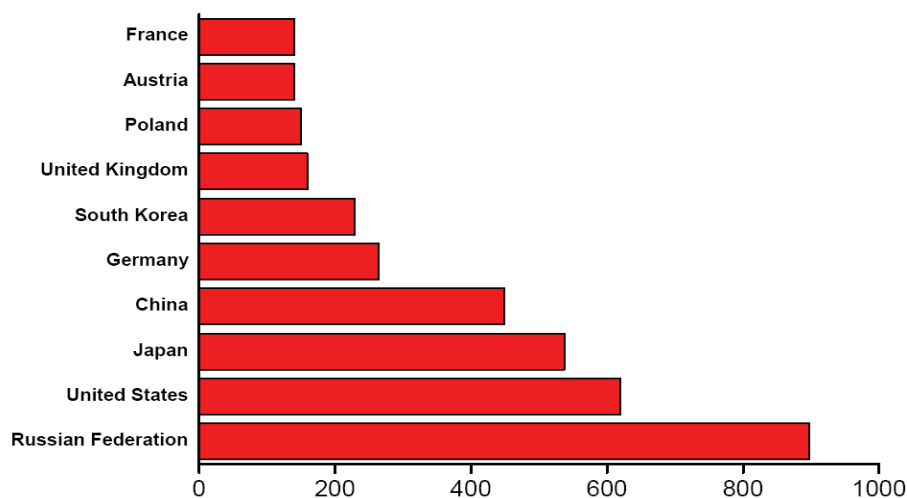


Рис. 2. Число публикаций десяти стран по тематике, посвященной наноструктурированным материалам, полученным воздействием интенсивной пластической деформации, за период с 1992 по 2012 г.

лее технологичное – получило за последние 10 лет. Общее число опубликованных за последние 20 лет работ в данной области («интенсивная пластическая деформация») составило 3601. Основная часть публикаций в данной области из этого числа принадлежит России (рис. 2).

Из рис. 3, на котором приведен анализ публикационной активности стран за период 1992–2002 гг., видно, что роль РФ в формировании данного направления исследований является определяющей.

По данным работы [31] число статей по тематике объемных наноструктурированных материалов, полученных воздействием интенсивной пластической деформацией составляет

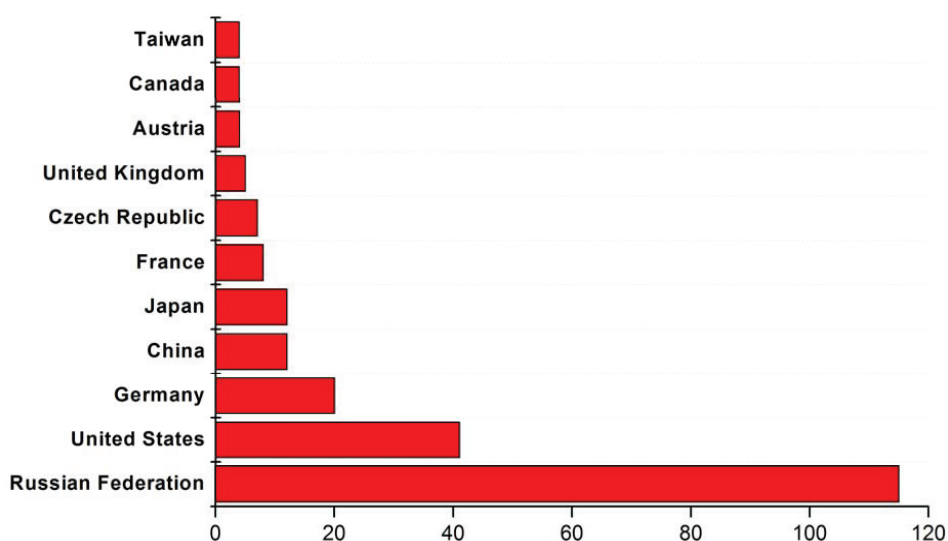


Рис. 3. Число публикаций десяти стран по тематике, посвященной наноструктурированным материалам, полученным воздействием интенсивной пластической деформации, за период с 1992 по 2002 г.

более 40 тыс. (табл. 1). В таблице приведено число статей, опубликованных в пяти ведущих журналах по тематике наноструктурированных материалов, полученных воздействием интенсивной пластической деформацией.

За последние десятилетия в России и за рубежом проводились исследования по разработке устройств и способов для получения металлов и сплавов в СМК- и НС-состояниях методами воздействия пластической деформацией с использованием различных схем деформационного воздействия. Разработанные устройства и способы позволяют получать НС-материалы с улучшенными прочностными свойствами. В России с использованием принципов интенсивной пластической деформации опубликовано около 100 патентов (см. ниже).

В нашей стране можно выделить три основных региона, в которых ведется работа в направлении разработки способов получения металлов и сплавов в СМК- и НС-состояниях методами воздействия пластической деформацией: Белгород, Уфа и Томск. Проведенный анализ результатов патентного поиска показал, что к промышленным способам получения СМК- и НС-состояний в титановых сплавах можно отнести разработанный в Белгороде

Таблица 1

Пять наиболее цитируемых журналов, публикующих работы в области наноструктурированных материалов, полученных воздействием интенсивной пластической деформации

Журнал	Импакт-фактор	Число статей
Progress in Materials Science	18.132	313
Acta Materialia	3.729	7028
Scripta Materialia	2.887	7187
Materials Science and Engineering A	1.806	19165
Metallurgical and Materials Transactions A	1.389	5363

(коллектив авторов Центра НСМН НИУ «БелГУ») метод, основанный на сочетании поперечно-винтовой и продольной прокаток, который потенциально может быть использован для получения трубных заготовок НС нержавеющей стали, титановых и циркониевых сплавов. Данный способ получения НС- и СМК-состояний является самостоятельным и не затрагивает описанные в других патентах способы и устройства, предназначенные для обработки металлов и сплавов воздействием пластической деформацией.

Список основных российских и зарубежных патентов в области тематики проекта:

- Патент РФ № 2389568 «Способ получения субмикроструктурной структуры в не легированном титане» (г. Белгород);
- Патент РФ № 2406083 «Способ определения дефектности титанового проката» (г. Белгород);
- Патент РФ № 2115759 «Способ получения полуфабрикатов с мелкокристаллической глобулярной структурой в α и $\alpha+\beta$ титановых сплавах, Институт проблем сверхпластичности металлов» (ИСПМ РАН, г. Уфа);
- Патент РФ № 2189883 «Способ пластического структурообразования металлов при интенсивной пластической деформации и устройство для его осуществления, Камский политехнический институт» (г. Набережные Челны);
- Патент РФ № 2146571 «Способ деформационной обработки материалов и устройство для его осуществления» (ИСПМ РАН, г. Уфа);
- Патент РФ № 2192497 «Способ получения изделий из титана и его сплавов с субмикроструктурной структурой, Институт физики прочности и материаловедения» (ИФПМ СО РАН, г. Томск);
- Патент РФ № 2175685 «Способ получения ультрамелкозернистых титановых заготовок, Уфимский государственный авиационный технический университет» (УГАТУ, г. Уфа);
- Патент РФ № 2347631 «Способ получения заготовок с мелкозернистой структурой со вращенной винтовой и продольной прокаток» (ГО ВПО УГАТУ, г. Уфа);
- Патент РФ № 2361687 «Способ получения длинномерных заготовок с мелкозернистой структурой» (ГО ВПО УГАТУ, г. Уфа);
- Патент РФ № RU2277992 «Способ получения заготовок с мелкозернистой структурой» (Р.Г. Баймурзин, Б.Е. Сельский, Н.К. Ценев, г. Уфа);
- Патент РФ № RU2383654 «Наноструктурный технически чистый титан для биомедицины и способ получения прутка из него» (ГО ВПО УГАТУ, г. Уфа);
- Патент РФ № 2388566 «Способ получения титановых сплавов с субмикроструктурной структурой деформированием с обеспечением интенсивной пластической деформации» (ИФПМ СО РАН, г. Томск);
- Патент CZ302421 «Process for producing nanostructural titanium half-finished product for implants» (M. Greger, L. Kander, M. Kursa, Чехия);
- Патент US6399215 «Ultrafine-grained titanium for medical implants» (Univ. California, США).

Пути решения проблемы. Несмотря на несомненную перспективность результатов уже проведенных научно-исследовательских работ по созданию СМК- и НС-материалов и исследованию их характеристик, широкому внедрению таких объемных металлов и сплавов технического назначения, полученных интенсивной пластической деформацией, в ядерную энергетику, авиастроение, судостроение и другие отрасли промышленности препятствует отсутствие систематических комплексных прикладных исследований с привлечением отраслевых институтов и конструкторских бюро.

В последние годы работы по созданию и исследованию объемных металлических СМК- и НС-материалов проводятся в ряде хорошо известных организаций в РФ и за рубежом. К их числу относятся НИУ «Белгородский госуниверситет» (г. Белгород), ГОУ ВПО УГАТУ (г. Уфа), ФТИ им. А.Ф. Иоффе РАН (г. С.-Петербург), ИХТТ УрО РАН (г. Екатеринбург),

ИПСМ РАН (г. Уфа), ИФМП СО РАН (г. Томск), НИТУ МИСиС (г. Москва), ЦНИИ КМ «Прометей» (г. С-Петербург), НФ ИМАШ РАН (г. Н. Новгород), Purdue и Harvard University, University of California (США), Oak Ridge и Sandia National Laboratory (США), Johns Hopkins University (США), University of Cambridge (Великобритания) и др. [6–17]. Однако в подавляющем большинстве случаев направление работ ориентировано на генерацию фундаментальных знаний, получаемых на основании исследования лабораторных образцов материалов, и не включают разработку промышленных технологий.

В частности, в РФ в Научно-образовательном и инновационном центре «Наноструктурные материалы и нанотехнологии» Белгородского государственного национального исследовательского университета (НОИЦ НСМН НИУ «БелГУ») за последние пять лет разработана технология формирования СМК- и НС-состояний в титане и нержавеющей стали с целью повышения прочностных характеристик при статическом и циклическом нагружениях при одновременном улучшении пластичности [4, 5, 18]. Достижение таких характеристик необходимо для использования данного материала при изготовлении изделий технического и медицинского назначения. В последние годы ведется разработка технологии формирования наноструктурного состояния в трубных заготовках титановых сплавов и нержавеющей стали.

Одним из успешных примеров внедрения объемных наноструктурированных материалов является наноструктурированный титан медицинского назначения. В научно-образовательном и инновационном центре «Наноструктурные материалы и нанотехнологии» НИУ «БелГУ» разработана малозатратная и высокопроизводительная технология получения СМК-, НС-титана марки ВТ1-0 (рис. 4) в виде прутков диаметром 6–8 мм (ТУ 1825-001-02079230-2009 «Прутки из субмикроструктурированного нелегированного титана») и полос сечением до 5,5х16,0 мм (ТУ 1825-002-02079230–2009 «Полосы и профили из субмикроструктурированного нелегированного титана»).

Налажено малотоннажное серийное производство данных изделий в малом инновационном предприятии ООО «Металл-деформ» (г. Белгород), созданном при НИУ «БелГУ» в рамках ФЗ № 217. Указанные изделия используются при производстве поставляемого в клинику РФ набора имплантатов для остеосинтеза трубчатых костей (ТУ 9438-031-47080839–2009 «Имплантаты для травматологии из наноструктурных титановых сплавов», производитель – ГУП РТ Всероссийский научно-исследовательский и проектный институт медицинского инструмента, г. Казань, регистрационное удостоверение Росздравнадзора № ФСР 2009/05990, сертификат № РОСС RU.ИМ06.В01126). В 2009 г. имплантаты, изготовленные из НС-тита-

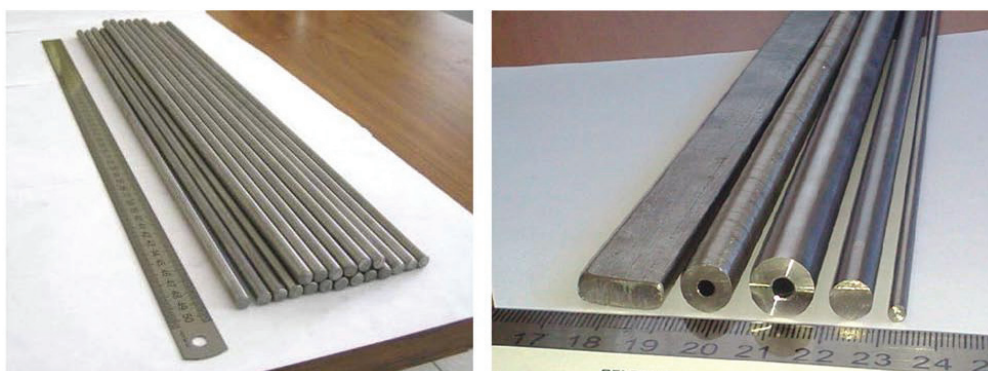


Рис. 4. Прутки (8,0×1000 СМК ТУ 1825-001-02079230-2009) и другие виды полуфабрикатов (прутки, пластины, трубки) из наноструктурированного нелегированного титана марки ВТ1-0

на марки ВТ1-0 по ТУ 9438-031-47080839-2009, успешно прошли клинические испытания в трех клиниках РФ (ГУ Научно-исследовательский центр Татарстана «Восстановительная травматология и ортопедия» (г. Казань), ГОУ ВПО «Российский университет дружбы народов» (г. Москва), Городская клиническая больница № 1 им. Н.И. Пирогова (г. Самара)). Начиная с декабря 2009 г., производятся коммерческие поставки указанного набора имплантатов в клиники РФ.

Научный коллектив Физического института им. П.Н. Лебедева РАН (ФИАН), вовлеченный в выполнение экспериментальной части по разработке способов модификации поверхности наноструктурированных металлов и сплавов, имеет значительный опыт фундаментальных экспериментальных исследований сверхбыстрой электронной и решеточной динамики в твердых материалах (диэлектриках, полупроводниках, металлах), возбужденных мощными фемтосекундными лазерными импульсами, а также нано- и фемтосекундного лазерного нано- и микроструктурирования поверхностей таких материалов и связанных с этим лазерноиндуцированных фазовых переходов (плавление, испарение и абляция), с помощью оригинальных динамических методов оптической и фотоакустической диагностики, стандартных методов стационарной атомно-силовой, сканирующей электронной и оптической микроскопии. К настоящему времени проведен ряд совместных исследований ФИАН и Центра «Наноструктурные материалы и нанотехнологии» НИУ «БелГУ» по фемтосекундной лазерной генерации квазипериодических наноструктур с субволновыми периодами (100–500 нм) на поверхностях различных твердых материалов, включая титан и титановые сплавы, в атмосфере воздуха и жидких средах, включая их химическую модификацию (окисление, азотирование, испарительная сегрегация химических компонент материала) [32–34]. Фемтосекундное лазерное воздействие на поверхность нано- и субмикрорекристаллических материалов в силу кратковременности лазерного воздействия и связанной с ним специфики механизмов транспорта энергии и вещества обеспечивает уникально малую глубину прогрева (менее 0,3 мкм – порядка размеров одного нанокристалла) и, таким образом, сохраняет НС- и СМК-характер поверхностного слоя и связанные с такой структурой преимущества таких материалов. Имеющиеся задел и опыт совместных исследований позволяют определить перспективные режимы фемтосекундной лазерной модификации поверхности НС титановых сплавов, нержавеющей стали и циркониевых сплавов.

Научный коллектив Института проблем химической физики РАН (ИПХФ РАН, г. Черноголовка), вовлеченный в выполнение работ по разработке способов защиты конструкционных материалов от водорода, имеет большой опыт в исследованиях водород-аккумулирующих материалов и механизмов взаимодействия водорода с металлами и сплавами, в том числе – в НС-состоянии [19]. Это позволяет проводить обоснование новых способов защиты материалов от вредного воздействия водорода, в том числе проявления водородной хрупкости металлов.

Перспективы применения СМК- и НС-материалов. Разработанные в настоящее время технологии формирования СМК- и НС-состояния в металлических материалах методами интенсивной пластической деформации позволяют повысить физико-механические свойства металлов и сплавов функционального и конструкционного назначения:

- увеличение в 1,5–3 раза прочности с сохранением высоких пластических свойств объемных образцов (отечественных) титановых и циркониевых сплавов, аустенитных сталей, что дает возможность их перспективного использования;
- увеличение сопротивления усталости в 1,5–2 раза, что позволяет использовать их в качестве материала конструкций, предназначенных для длительной работы в условиях знакопеременной нагрузки;
- увеличение коррозионной стойкости, в том числе в условиях одновременного воздействия агрессивной среды и нагрузки, что позволяет использовать их в качестве материалов, работающих в условиях внешней агрессивной среды, в том числе водородсодержащей.

Таблица 2

Прочностные характеристики титановых сплавов, нержавеющей стали и циркониевых сплавов

Материал	Предел текучести/предел прочности	
	Наноструктурированное состояние	Крупнозернистый аналог
Титановый сплав ВТ1-0	850/950	390/460
Титановый сплав ВТ6	1320/1430	900/990
Титановый сплав ПТЗВ	1070/1220	640/760
Нержавеющая сталь 12Х18Н10Т	1050/1260	216/529
Циркониевый сплав Э125	600/750	350/420

Рассмотрим сводную табл. 2 прочностных свойств (предел текучести и предел прочности) титановых сплавов, нержавеющей стали и циркониевых сплавов в наноструктурированном и крупнозернистом состояниях. Видно, что для всех материалов формирование НС-состояния приводит к увеличению прочностных свойств в 1,5–2 раза по сравнению с крупнозернистым аналогом.

Применение оригинальной технологии интенсивной пластической деформации при производстве полуфабрикатов (прутки, трубы) позволит снизить энергозатраты на 20–30 %, повысить коэффициент использования материала до 0,7–0,8 и увеличить производительность процесса. Результатом этого будет снижение себестоимости выпускаемой продукции и увеличение конкурентоспособности по отношению к лучшим зарубежным образцам. По сравнению с аналогом стоимость материала в НС-состоянии составит 150–200 %.

Кроме того, существуют еще и другие аспекты влияния внедрения предлагаемых СМК- и НС-материалов на развитие Российской Федерации. Во-первых, это технико-экономический аспект, связанный с повышением качества продукции, а именно водо-водяной энергетический реактор (ВВЭР) атомного машиностроения и ее конкурентоспособности на международном рынке, а также с повышением производительности труда работников АЭС. Экологическим аспектом промышленного внедрения СМК- и НС-материалов в атомной индустрии Российской Федерации является снижение среднего времени ожидания аварийных остановок реакторов АЭС из-за выхода из строя их парогенераторов. В социальном плане, тесно связанном, с одной стороны, с технико-экономическим эффектом, а с другой стороны – с экологическим эффектом, такое влияние будет проявляться, соответственно, в повышении уровня оплаты труда работников атомной индустрии (в результате реализации конкурентных преимуществ атомных реакторов, использующих для ВВЭР материалы в НС-состоянии) и качества жизни жителей регионов, где расположены АЭС с ВВЭР.

Заключение. Проведенный анализ показывает, что тема разработки и внедрения материалов в субмикроструктурном и наноструктурном состояниях является остроактуальной в области материаловедения металлов (металлургия, трибология, электрохимия) в мировом масштабе и лежит в русле развития научно-технологического комплекса Российской Федерации. Существенно, что Россия уже на настоящий момент располагает необходимыми центрами компетенции для проведения исследований и реализации этих разработок в своей атомной индустрии, что должно обеспечить не только технический, но и экономический, социальный и экологический эффекты их внедрения. В частности, разработка наноструктурных титановых и циркониевых сплавов, а также нержавеющей стали, в том числе с модифицированной поверхностью, обеспечивающих повышение конструкционных и функ-

циональных свойств (в том числе коррозионную стойкость в экстремальных условиях эксплуатации) для повышения надежности работы теплообменных труб парогенераторов АЭС различного типа представляется актуальной и своевременной задачей.

Список литературы

1. **Иванов С.О.** Влияние литий-ферритной пленки на замедление процесса коррозионного растрескивания теплообменных труб парогенераторов АЭС с ВВЭР. Дис. канд. техн. наук. 2006.
2. **Мельникова Е.Н., Грабовецкая Г.П., Колобов Ю.Р.** Влияние водорода на деформационное поведение и разрушение сплава Ti-6Al-4V // Деформация и разрушение материалов. 2008. № 9.
3. **Чувильдеев В.Н., Копылов В.И., Бахметьев А.М. и др.** Эффект одновременного повышения прочности и коррозионной стойкости микрокристаллических титановых сплавов // Доклады Академии наук. 2012. Т. 442. № 3.
4. **Kolobov Yu.R., Valiev R.Z., Grabovetskaya G.P. et al.** Grain Boundary Diffusion and Properties of Nanostructured Materials // Cambridge International Science Publishing. 2007.
5. **Колобов Ю.Р., Каблов Е.Н., Козлов Э.В. и др.** Структура и свойства интерметаллидных материалов с нанозфазным упрочнением. М.: Изд-во «МИСиС», 2008.
6. **Гусев А.И.** Эффекты нанокристаллического состояния в компактных металлах и соединениях // Успехи физических наук. 1998. Т. 168. Вып.1
7. **Поздняков В.А., Глезер А.М.** Структурные механизмы разрушения нанокристаллических материалов // Физика твердого тела. 2005. Т. 47. Вып. 5.
8. **Смирнов Б.И., Шпейзман В.В., Николаев В.И.** Высокая прочность и сверхпластичность нанокристаллических материалов // Физика твердого тела. 2005. Т.47. Вып. 5.
9. **Sergueeva A.V., Mara N.A., Mukherjee A.K.** Grain boundary sliding in nanomaterials at elevated temperatures // J. Mater. Sci. 2007. V. 42.
10. **Li P.-Y., Zhang X.-Y., Wu X.-L., Huang Y.-N., Meng X.-K.** Internal friction of bend-deformed nanocrystalline nickel by mechanical spectroscopy // Chin. Phys. Lett. 2008. V. 25.
11. **Shan Z., Knapp J.A., Follstaedt D.M., Stach E.A., Wiezorek J.M., Mao S.X.** Inter- and intra-agglomerate fracture in nanocrystalline nickel // Phys. Rev. Lett. 2008. V. 100.
12. **Tian J., Dai K., Villegas J.C. et al.** Tensile properties of a nickel-base alloy subjected to surface severe plastic deformation // Materials science and engineering A. 2008. V. 493 (Special Issue: SI).
13. **Маклецов В.Г.** Электрохимические свойства наноструктур на основе железа при кислотной коррозии // Вестник Удмуртского университета. 2011. Вып. 2.
14. **Nie F.L., Wang S.G., Wang Y.B. et al.** Comparative study on corrosion resistance and in vitro biocompatibility of bulk nanocrystalline and microcrystalline biomedical 304 stainless steel // Dental materials. 2011. V. 27. Issue 7.
15. **Kim H.S., Yoo S.J., Ahn J.W. et al.** Ultrafine grained titanium sheets with high strength and high corrosion resistance // Materials science and engineering A. 2011. V. 528. Issue: 29-30.
16. **Zadorozhnyy V.Yu., Inoue A., Louzguine-Luzgin D.V.** Ti-based nanostructured low-alloy with high strength and ductility // Materials science and engineering A. 2012. V. 551.
17. **Wen M., Wen C., Hodgson P. et al.** Thermal oxidation behaviour of bulk titanium with nanocrystalline surface layer // Corrosion science. 2012. V. 59.
18. **Иванов М.Б., Колобов Ю.Р., Голосов Е.В., Кузьменко И.Н., Вейнов В.П., Нечаенко Д.А., Кунгурцев Е.С.** Механические свойства наноструктурного титана серийного производства // Российские нанотехнологии. 2011. Т. 6. № 5–6.
19. **Андреевский Р.А.** Наноматериалы: концепция и современные проблемы // Росс. химический журнал. 2002. Т. XLVI. № 5.

20. **Физико-химия** ультрадисперсных систем (двухгодичная Всероссийская конференция).
21. **International Symposium on Ultrafine Grained Materials.**
22. **International Conference on New Research Trends in Materials Science.**
23. **Symposium on Mechanical Behavior of Nanostructured Materials.**
24. **International Conference on Nanostructured Materials (NANO).**
25. **Latin American Conference on Metastable and Nanostructured Materials NANOMAT.** URL: www.nanomat2012.dema.ufscar.br/index.html, <http://www.bing.com/>.
26. **Conference on Functional and Nanostructured Materials FNMA.** URL: <http://fnma12.gda.pl/>.
27. **Малыгин Г.А.** Пластичность и прочность микро- и нанокристаллических материалов // Физика твердого тела. 2007. Т. 49. Вып. 6.
28. **Ремпель А.А.** Нанотехнологии, свойства и применение наноструктурированных материалов // Успехи химии. 2007. Т. 76. Вып. 5.
29. **Zehetbauer M., Groessinger R., Krenn H. et al.** Bulk Nanostructured Functional Materials By Severe Plastic Deformation // Advanced engineering materials. 2010. V. 12. Issue: 8 (Special Issue: SI).
30. **Zhao Y., Zhu Y., Lavernia E.J.** Strategies for Improving Tensile Ductility of Bulk Nanostructured Materials // Advanced engineering materials. 2010. V. 12. Issue: 8 (Special Issue: SI).
31. **Langdon T.G.** Impact of bulk nanostructured materials in modern research // Rev. Adv. Mater. Sci. 2010. № 25.
32. **Голосов Е.В., Емельянов В.И., Ионин А.А., Колобов Ю.Р., Кудряшов С.И., Лигачев А.Е., Новоселов Ю.Н., Селезнев Л.В., Сеницын Д.В.** Фемтосекундная лазерная запись субволновых одномерных квазипериодических наноструктур на поверхности титана // Письма в ЖЭТФ. 2009. Т. 90.
33. **Голосов Е.В., Емельянов В.И., Ионин А.А., Колобов Ю.Р., Кудряшов С.И., Лигачев А.Е., Новоселов Ю.Н., Селезнев Л.В., Сеницын Д.В.** Модификация поверхности титана с помощью импульсного лазерного излучения фемтосекундной длительности // Физика и химия обработки материалов. 2010. № 2.
34. **Голосов Е.В., Ионин А.А., Колобов Ю.Р., Кудряшов С.И., Лигачев А.Е., Новоселов Ю.Н., Селезнев Л.В., Сеницын Д.В.** Сверхбыстрая оптика поверхности титана и фемтосекундная лазерная запись одномерных нанорешеток ее рельефа // ЖЭТФ. 2011. Т. 140. № 1(7).