

номерные особотонкостенные трубы из коррозионностойкой стали TP 316L и ее аналогов, являются качественным, надежным материалом, отвечающим основным и дополнительным требованиям стандартов. С учетом экономической целесообразности, связанной со значительным удешевлением по сравнению с бесшовными трубами, рекомендовано расширение применения сварных труб в оборудовании определенного типа. Вместе с тем, для эксплуатации сварных труб в оборудовании ответственного назначения при агрессивных условиях требуется уточнение требований к трубам по некоторым параметрам. Для этого, прежде всего, необходимо продолжить исследования по отработке методик неразрушающего контроля (ультразвукового, вихретокового) и коррозионных испытаний (на стойкость к МКК) сварных швов, а также уточнения критериев по питтинговой коррозии.

Библиографический список

1. Уайэтт Л. М. Материалы ядерных энергетических установок. – М.: Атомиздат, 1979. – 255 с.
2. Хэнсон К. Ф. Тенденции использования титана в теплообменных аппаратах // Материалы 3-й Международной конференции «Титан. Металловедение и технология». – М.: ВИЛС, 1978. – С. 423-435.

3. ГОСТ 11068-81 «Трубы электросварные из коррозионностойкой стали» с изм. – М.: Изд-во стандартов, 1982. – 8 с.

4. ASTM A249/A249M-10a «Стандартная спецификация на сварные трубы из аустенитной стали для котлов, пароперегревателей, теплообменников и конденсаторов». – ASTM Комитет США, 2010. – 10 с.

5. EN 10217-7:2005 «Сварные стальные трубы для работы под давлением. Технические условия поставки. – Часть 7: трубы из нержавеющей стали. – Европейский комитет по стандартизации (CEN), Брюссель, 2005. – 38 с.

6. Обеспечение качества труб из коррозионностойких сталей по зарубежным стандартам / Т. Н. Буряк, В. С. Вахрушева, Н. В. Ярошенко и др. // Сталь, Москва. – 2009. – № 6. – С. 61-64.

7. Пути улучшения качественных показателей труб из коррозионностойкой стали аустенитного класса / Т. Н. Буряк, В. С. Вахрушева, Н. В. Ярошенко и др. // Металлург. и горноруд. пром-сть. – 2008. – № 3. – С. 53-87.

8. Использование непрерывнолитой заготовки для производства труб из коррозионностойких сталей / Г. Г. Шепель, Т. Н. Буряк, Н. В. Ярошенко и др. // Металлург. и горноруд. пром-сть. – 2010. – № 1. – С. 65-67.

9. ASTM A213/A213M-04b «Стандарт на бесшовные ферритные и аустенитные легированные котельные, пароперегревательные и теплообменные трубы». – ASTM Комитет США, 2004. – 16 с.

Поступила 27.04.2014



УДК 621.774
Кузнецов Е. Д. / д. т. н./
ГП «НИТИ»

Производство

Технологические и метрологические аспекты организации производства в Украине циркониевых труб с повышенными эксплуатационными свойствами

Рассмотрены потенциальные причины разрушения циркониевых труб, используемых в качестве оболочек ТВЭЛ атомных реакторов, их взаимосвязь с размерными погрешностями поверхностей и отклонениями внутреннего диаметра. Показаны недостатки технологии с применением струйного травления. Ил. 5. Табл. 1. Библиогр.: 17 назв.

Ключевые слова: циркониевые трубы, топливные оболочки, долговечность, состояние поверхностей, размерные погрешности, механизмы разрушения

Potential reasons of failure of zirconium tubes used as claddings of nuclear reactors, their relationship with surface dimensional inaccuracies and inner diameter deviations are considered. The drawbacks of the technology using the jet etching are shown.

Keywords: zirconium tubes, fuel cladding, endurance, surface condition, dimensional inaccuracies, failure procedures

Среди обширной номенклатуры холоднокатаных труб, изготавливаемых из высоколегированных сталей и сплавов, по сложности технологии, требованиям, предъявляемым к качеству, и, главное, по условиям эксплуатации вне всякого сомнения лидирующее место занимают трубы из сплавов циркония. Их используют в активных зонах атомных реакторов в качестве оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ). Детали технологии изготовления ТВЭЛ и ТВС и условия их эксплуатации подробно изложены в [1].

В ряде публикаций отмечается особая актуальность проблемы увеличения выгорания ядерного топлива. Поскольку в настоящее время этот показатель сравнительно мал и во многом лимитирует долговечность оболочек ТВЭЛ. Их разрушение в значительной мере обусловлено воздействием высоких температур, агрессивных сред и других причин, присущих специфике активных зон атомных реакторов.

Механизм разрушения ТВЭЛ

Не касаясь влияния эксплуатационных режимов реактора, отметим, что в проанализированных литературных и патентных источниках наиболее значимыми потенциальными причинами разрушения оболочек называют следующие:

- уменьшение пластичности вследствие водородного охрупчивания (*hydrogen embrittlement*);
- набухание топливных таблеток (*fuel swelling*) и ползучесть оболочек в процессе эксплуатации;
- образование контактов топливных таблеток с внутренней поверхностью оболочек (*pellet-cladding interaction*);
- воздействие на внутреннюю поверхность агрессивных сред, образующихся при выгорании ядерного топлива.

Вкратце остановимся на них.

Водородное охрупчивание

В [5] сообщается, что сплавы циркония склонны к водородному охрупчиванию.

Считают, что оно возникает вследствие контакта наружной поверхности оболочки с охлаждающей водой и сопровождается выделением водорода с образованием окисного слоя. При этом часть водорода, в пределах 5-20 %, диффундирует через этот слой в сплав и образует хрупкую фазу гидридов циркония, что приводит к охрупчиванию оболочки и последующему ее разрушению. Отмечается, что интенсивность образования гидридов существенно возрастает вблизи дефектов поверхности [6]. Считают, что процесс разрушения является следствием низкой прочности и пластичности гидридных соединений. Однако остается не вполне ясным, каким образом по существу нейтральная вода вступает во взаимодействие с коррозионно стойким сплавом циркония, каков механизм образования водорода и его последующая диффузия в оболочку ТВЭЛ.

Распухание топливных таблеток

В ряде публикаций указывается, что для увеличения долговечности ТВЭЛ особую значимость имеет постоянство зазора между топливными таблетками и внутренней поверхностью оболочки. Оно обусловлено тем, что в процессе эксплуатации происходит два противоположных процесса – набухание таблеток и уменьшение диаметра оболочек вследствие ползучести [3-6]. В следствии этого уменьшается зазор между внутренней поверхностью оболочки и топливной таблеткой.

В следствии этого повышается давление, действующее на внутреннюю поверхность оболочки, что в конечном итоге приводит к ее разрушению. В связи с этим особую значимость приобретает необходимость обеспечения постоянства зазора, что влечет за собой необходимость повышения точности внутреннего диаметра труб и наружного диаметра топливных таблеток, а также их взаимозаменяемости по этому показателю в комплекте ТВС. В настоящее время это обстоятельство учитывается не в достаточной мере при нормировании показателей точности внутреннего диаметра циркониевых труб.

Состояние микро рельефа внутренней поверхности циркониевых труб

В [7] показано, что для труб, изготавливаемых способом холодной периодической прокаткой, характерно образование на внутренней поверхности локальных углублений и выступов, потенциально способных стать концентраторами напряжений при воздействии внутреннего давления. Этот вывод подтвержден в [8] результатами моделирования различных видов неровностей, выполненного с использованием метода конечных элементов.

Воздействие агрессивных сред в процессе выгорания ядерного топлива

В [9] отмечается, что в процессе выгорания ядерного топлива выделяется газообразный йод и другие агрессивные продукты ядерной реакции, способные оказывать коррозионное воздействие на внутреннюю поверхность оболочки. В исследованиях, проведенных с целью изучения размерной структуры микро рельефа внутренней поверхности холоднокатаных труб широкого сортамента, установлено, что внутренняя поверхность холоднокатаных труб, в общем случае, содержит совокупность продольно ориентированных узких впадин и выступов [10-12]. В них могут аккумулироваться продукты распада ядерного топлива, ускоряющие разрушение труб, используемых в энергетических установках.

Метрологические аспекты оценки качества циркониевых труб и перспективы обеспечения их взаимозаменяемости

Рассмотренные выше потенциальные механизмы разрушения топливных оболочек дают основание сделать вывод, что эксплуатационная долговечность ТВЭЛ в значительной мере зависит от состояния поверхностей и точности внутреннего диаметра труб. При этом неизбежно возникнет, как минимум, две проблемы: метрологическая, обусловленная необходимостью обеспечения достоверной оценки показателей качества, и технологическая, связанная со способностью изготовителей труб обеспечить перспективные показатели качества. В общих чертах суть этих проблем рассмотрена в [13].

Достоверность оценки состояния наружной поверхности труб

Известно, что в процессе эксплуатации наружная поверхность оболочек в активной зоне атомного реактора подвергается интенсивному воздействию потоков охлаждающей воды. При этом из-за наличия выступов, впадин и других видов неоднородностей поверхности неизбежно образование локального замедления скорости перемещения воды, что может приводить к образованию микрокавитации поверхности. Также известно, что кавитация сопровождается образованием высокоактивных пузырьков газов, которые активно воздействуют на поверхности.

По видимому, этим обстоятельством можно объяснить интенсивную диффузию водорода в циркониевую оболочку ТВЭЛ, приводящей к образованию хрупких гидридов. Процесс кавитации и его воздействие на металлические поверхности детально рассмотрен в многочисленных литературных источниках, но применительно к воздействию на оболочки ТВЭЛ этот механизм пока не получил должного рассмотрения.

Сведения, приведенные в [14, 15], дают основание полагать, что наружная поверхность циркониевых труб, подвергаемых поперечной шлифовке, содержит поперечные, относительно глубокие, выступы, впадины и другие виды неоднородностей, которые неизбежно могут стать потенциальными причинами образования кавитации и последующего ускоренного образования гидридов циркония.

О важности предпосылок, порождающих кавитацию, свидетельствует и введение международного стандарта ANSI/ASME B46.1-2002: Surface Texture, Surface Roughness, Waviness and Lay. Этот стандарт предписывает для оценки состояния поверхностей, подвергающихся воздействию потоков жидкостей и газов, проведение 3D (трехмерной) оценки, и на ее основе определение

функциональных параметров, в первую очередь индексов несущей поверхности и свойств задержки жидкостей. Этот стандарт и другие многочисленные публикации свидетельствуют о том, что в подобных случаях традиционное использование показателя Ra и других одномерных характеристик вообще не имеет какого-либо смысла.

Размерная неоднородность профилей поперечных сечений внутренней поверхности труб

В [15-17] показано, что для внутренней поверхности холоднокатаных труб присуща ярко выраженная продольная ориентация впадин и выступов. Эта закономерность исключает применение традиционного профилографирования, основанного на перемещении измерительного щупа в продольном направлении по образующей. Априори можно утверждать, что в этом случае неизбежно возникновение существенных размерных погрешностей, поскольку датчик перемещается (или) либо по вершинам выступов, или по основанию углублений.

Другой причиной образования размерных погрешностей является применение стандартной методики профилографирования является выбор длины трассы измерения, величины дискретности и характеристик фильтров. При этом следует учитывать, что эти параметры нормированы применительно к поверхностям, большей частью подвергавшихся механической обработке, и вследствие этого содержащих регулярные отклонения, образованные режущим инструментом. Механизм формирования внутренней поверхности труб и других процессов пластической деформации совершенно иной, и требует применения иных методов оценки ее состояния.

Для выявления структуры внутренней поверхности холоднокатаных труб проведено непрерывное сканирование в поперечных сечениях с помощью контактного датчика с радиусом закругления измерительного щупа 1,5 мкм. При этом в каждом поперечном сечении определяли до 3500 значений профиля с погрешностью ± 1 мкм. Для 3D анализа внутренней поверхности проводилось ее сканирование в последовательности поперечных сечений с шагом 2 мм в продольном направлении, что позволяло сформировать трехмерные матрицы, каждая из которых содержала более 800 000 значений повышенной точности. В дальнейшем результаты таких измерений подвергали фильтрации и другой математической обработке с использованием стандартного математического обеспечения.

На основе выполненных исследований установлено, что профили поперечных сечений внутренней поверхности холоднокатаных труб отличаются ярко выраженной нестационарностью. Об этой особенности свидетельствует график, приведенный на рис. 1.

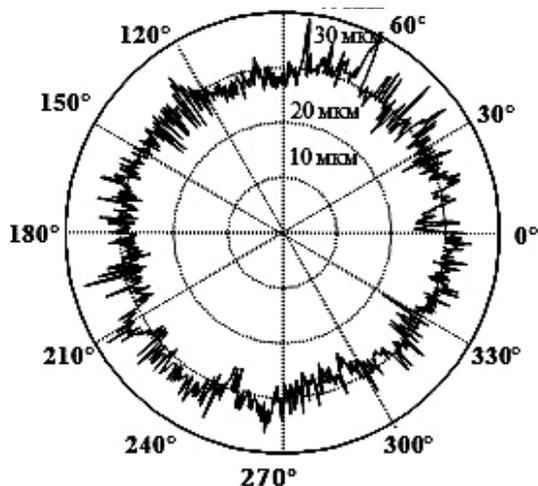


Рис. 1. Отклонения профиля поперечного сечения внутренней поверхности, труба размером 35×5 мм, сплав Zr1Nb

В общем случае внутренняя поверхность труб содержит периодические и случайные составляющие, о соотношении которых можно судить по виду нормированной автокорреляционной функции, показанной на рис. 2, на котором отчетливо просматривается наличие периодической компоненты с шагом порядка 3-4 мкм

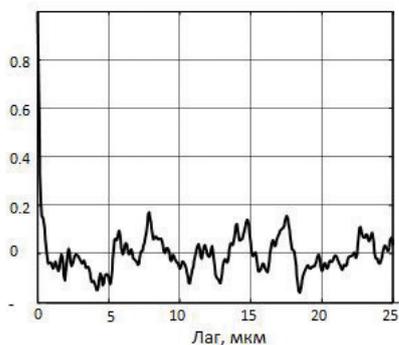


Рис. 2. Нормированная автокорреляционная функция профиля поперечного сечения внутренней поверхности трубы размером 9,1×0,7 мм, сплав Zr1Nb

О соотношении случайной и периодической составляющих свидетельствуют данные, приведенные на рис. 3, где показана аппроксимация поперечного профиля с использованием ряда Фурье.

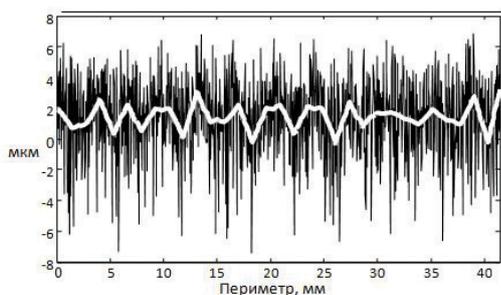


Рис. 3. Макро (светлая) и микро (темные) составляющие отклонений профиля поперечного сечения внутренней поверхности, труба 17×1,9 мм, сплав Zr1Nb

На основе этих исследований показано, что в общем случае профили поперечных сечений холоднокатаных труб содержат макро отклонения с периодом в интервале от 0,3 мм. длины периметра до 1 мм, и микро отклонения, имеющие существенно меньшие периоды, вплоть до нано диапазонов.

Функциональные свойства поверхностей труб

Характер макро отклонений поперечного сечения наружной поверхности, показанный на рис. 4, дает основание сделать вывод о том, что часто употребляемый термин «овальность» в общем случае не применим для классификации точности наружного диаметра холоднокатаных труб. При поперечной шлифовке такого рода отклонения неизбежно приведут к образованию повышенной неоднородности наружной поверхности и в последствие могут стать потенциальными источниками образования кавитации.

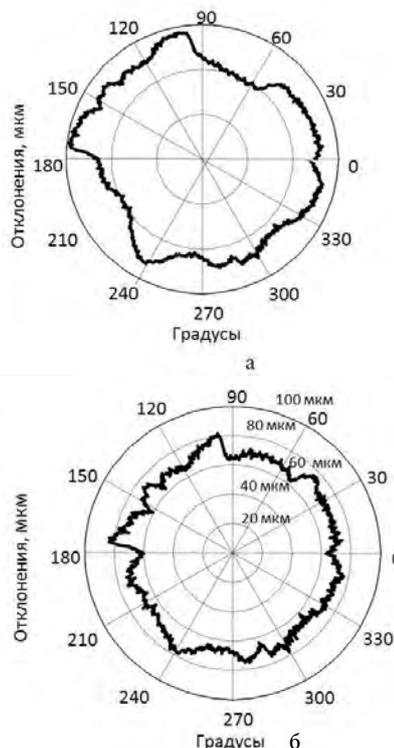


Рис. 4. Профили поперечного сечения трубы размером 9,1×0,7 мм, сплав Zr1Nb: а - наружный профиль; б - внутренний профиль

Профиль поперечного сечения внутренней поверхности, показанный на рис. 4, свидетельствует о том, что при эксплуатации в местах макро углублений неизбежно возникновение повышенных растягивающих напряжений, а выступы могут приводить к образованию локальных контактов с топливными таблетками, ускоряющих деградацию оболочек.

С точки зрения обеспечения оптимального зазора, система «оболочка-топливная таблетка» близка к широко используемой в механике системе «вал-отверстие».

В теории допусков и посадок машиностроители для обеспечения функциональных свойств таких соединений нормируют требования к точности диаметра и отклонениям от круглости обоих составляющих, а также методы их оценки. Подобного рода требования, применительно к функциональным свойствам оболочек ТВЭЛ, не формулируются. Более того, циркониевые трубы изготавливают лишь с односторонним допуском по внутреннему диаметру.

Склонность внутренней поверхности труб к коррозионному воздействию

В стандарте ANSI/ASME B46.1-2002 предлагается для оценки склонности поверхности к коррозии использовать показатель «bearing surface» (опорная или несущая поверхность). Считают, что чем больше этот показатель, тем поверхность менее склонна к воздействию агрессивных сред.

На рис. 5 представлены результаты определения этого показателя, выполненные применительно к внутренней поверхности трубы 9,1×0,7 мм из сплава Zr1Nb.

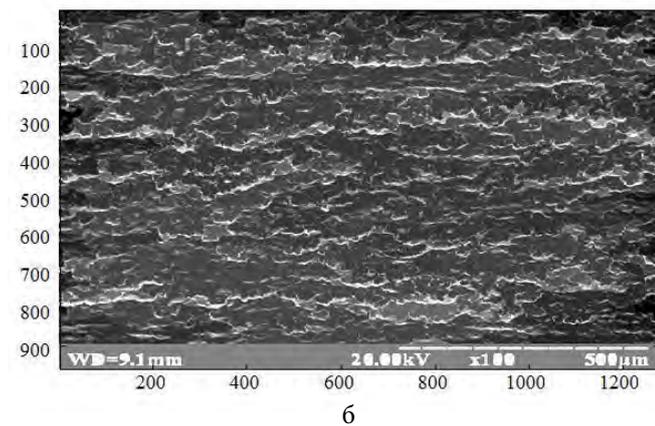
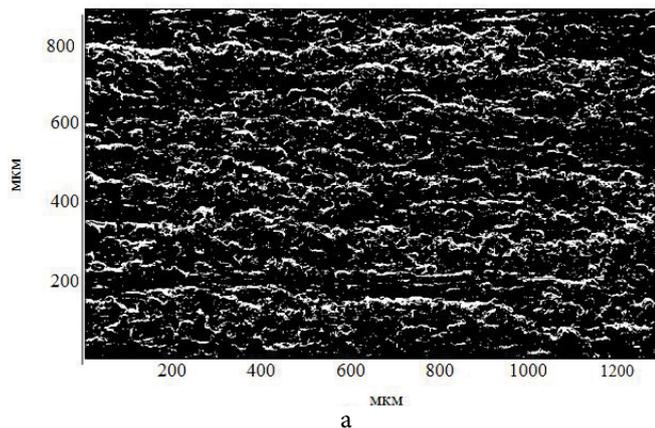


Рис. 5. Оценка опорной поверхности, труба 9,1×0,7 мм, сплав Zr1Nb, ×100, площадь изображения 1,23 мм², опорная площадь 0,23 мм², (19 %): а -растровое изображение; б - бинарное изображение

В верхней части рисунка приведен снимок, сделанный при помощи растрового электронного микроскопа при увеличении ×100. На нижнем показано его преобразование в бинарное изображение, на котором участки опорной поверхно-

сти проявилась в виде узких продольных полосок белого цвета. Расчетным путем установлено, что их суммарная площадь составила всего лишь 19 % от общей площади снимка, что свидетельствует об относительно слабой стойкости таких труб к воздействию агрессивных сред при эксплуатации и необходимости внесения соответствующих корректив в технологию их изготовления.

Эффективность струйного травления

Стандартный технологический процесс изготовления циркониевых труб предусматривает применение на конечном размере струйного травления. Эта операция используется для удаления дефектов внутренней поверхности. Для оценки ее эффективности проведен анализ внутренней поверхности труб 9,1×0,7 мм из сплава Zr1Nb, соответствующих обоим состояниям. Было установлено, что при струйном травлении происходит лишь частичное выравнивание поверхности за счет стравливания локальных выступов, но при этом не достигается существенного изменения впадин.

Об ограниченной эффективности операции струйного травления свидетельствуют результаты математической обработки снимков внутренней поверхности труб в состоянии после прокатки и последующего струйного травления. Результаты их математической обработки приведены в таблице, где информационная энтропия является характеристикой случайности или неоднородности поверхности.

Полученные результаты свидетельствуют об ограниченных возможностях струйного травления. Эта операция может обеспечить эффект улучшения качества поверхности только за счет стравливания выступов микрорельефа, в то время как впадины, в основном, остаются без заметного изменения.

Таблица. Результаты математической обработки однородности внутренней поверхности труб

Характеристики изображений	Состояние поверхностей			
	После прокатки		После струйного травления	
Увеличение	×200	×1000	×200	×1000
Дискретность измерений, мкм	0,655	0,130	0,655	0,130
Размеры поверхностей, мкм	345×546	75×110	337×550	72×110
Дисперсия	7,23	7,38	6,84	6,74
Информационная энтропия	55,9	47,6	45,5	45,4

Выводы

Украина ежегодно импортирует для своих атомных станций ядерное топливо на сумму порядка 700-800 долларов США. Эти затраты могут быть сокращены минимум в два раза за счет увеличения эксплуатационной долговечности ТВЭЛ.

Украина обладает большими запасами урана

и циркония, а также производственными мощностями, пригодными для организации собственного производства циркониевых труб более высокого качества по сравнению с используемыми в ТВЭЛ, закупаемым по импорту в настоящее время. При этом следует учитывать, что в импортируемых в настоящее время ТВЭЛ используются циркониевые трубы, изготавливаемые по морально устаревшей технологии. Увеличение долговечности циркониевых труб может быть достигнуто за счет модернизации технологического процесса изготовления циркониевых труб, обеспечивающей повышение качества поверхностей труб и точности внутреннего диаметра.

Библиографический список

1. Займовский А. С., Никулина А. В., Решетников Н. Г. Циркониевые сплавы в атомной энергетике, М., 1981.

2. Chung, Yaggee, Kassner. Fracture Behavior and Microstructural Characteristics of Irradiated Zircaloy Cladding. Argonne National Laboratory. Paper ID: STP28158S Committee/Subcommittee: B10.05 DOI: 10.1520/STP28158S P. 26 Published: Jan 1987.

3. DOE-HDBK-1017/2-93, January 1993, DOE Fundamentals Handbook, Material Science, Volume 2 of 2, U.S. Department of Energy, January 2003, P. 12, 24.

4. Delayed hydride cracking in zirconium alloys in pressure tube nuclear reactors, Final report of a coordinated research project 1998-2002, IAEA, October 2004.

5. D. Carpenter. Comparison of Pellet-Cladding Mechanical Interaction for Zircaloy and Silicon Carbide Clad Fuel Rods in Pressurized Water Reactors. Massachusetts Institute of Technology, Department of Nuclear Engineering, 12.11.2006, P. 20.

6. Steven Nesbit, Michael Kennard, Suresh Yagnik. Use of Core analyses in Assessments of Fuel Failure Risk Due Pellet Cladding Interaction. Advances in Nuclear Fuel Management IV (ANFM 2009) Hilton Head Island, South Carolina, USA, April 12-15, 2009.

7. Кузнецов Д. Е. Исследование размерной структуры профилей поперечных сечений бесшовных труб / Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Том XI. Пластична деформація металів. Дніпропетровськ: «Системні технології». - 2008. - С. 305-311.

8. Rizgar Mella. Finite Element Modelling of Pellet-cladding Interaction in Advanced Gas-cooled Reactors. Imperial College/ London. Supervised by Dr. M R. Wenman. UNTF 2011.

9. Park S. Y., Kim J. H., Lee M. H., Jeong Y. H. Stress-corrosion crack initiation and propagation behavior of Zircaloy-4 cladding under an iodine environment. Journal of Nuclear Materials. 372: 2007.

10. Кузнецов Е. Д., Чигиринец Е. Э. Совершенствование технологии изготовления труб из коррозионностойких сталей для энергетических установок / Сталь - 2010. - № 2. - С. 48-51.

11. Кузнецов Е. Д., Чигиринец Е. Э. Достоверность оценки коррозионной стойкости металлов / Труды X международной конференции «Проблемы коррозии и противокоррозионной защиты конструкционных материалов». Львов. 8-11 июля. 2010. - С. 549-555.

12. Кузнецов Е. Д., Чигиринец Е. Э., Каменская Т. А. Метрологические аспекты и оценки коррозионной стойкости труб, используемых в энергетических установках / Metallurg. и горноруд. пром-сть - 2011. - № 1. - С. 71-76.

13. Eugenie D. Kuznetsov. Metrological aspects of assessments of the quality of tubes used as fuel cladding and condenser tubes. NUCLEAR EXCHANGE. September 2012. P. 36-40.

14. Развитие работ по разработке сплавов циркония для оболочек ТВЭЛ и деталей ТВС / В. А. Маркелов, В. В. Новиков, В. Ф. Коньков, М. М. Перегуд, В. Н. Шишов, А. Ю. Гусев // Тезисы докладов НТК-2008 «Ядерное топливо нового поколения для АЭС. Результаты разработки, опыт эксплуатации и направление развития», 19-21 ноября 2008 г., ВНИИИМ, с. 43.

15. Peregud M. M., Markelov V. A., Novikov V. V., Gusev A. Yu., Kon'kov V. F. JSC «VNIINM», Yu. V. Pimenov, JSC «TVEL», Agapitov V. A., Shtutsa M. G., JSC «ChMP». Characteristics and Properties of Cladding Tubes for VVER-1000 Higher Uranium Content Fuel Rods, 8-th International conference on WWER fuel performance, modeling and experimental support. 2009.

16. Кузнецов Д. Е. Взаимозаменяемость оболочек тепловыделяющих элементов атомных реакторов. Вопросы атомной науки и техники / Д. Е. Кузнецов, В. С. Вахрушева, Е. Д. Кузнецов // Серия «Физика радиационных повреждений и радиационное материаловедение», Национальная академия наук Украины, Национальный научный центр «Харьковский физико-технический институт». - 2006. - № 4. - С. 90-96.

17. Кузнецов Д. Е. Методические особенности исследования размерных характеристик внутренней поверхности труб / Сучасні проблеми металургії. Наукові вісті. Том 8. Пластична деформація металів. Дніпропетровськ: «Системні технології». - 2005. - С. 456-460.

Поступила 28.04.2014

