



Received: 23.07.2024
Revised: 16.10.2024
Accepted: 25.10.2024
DOI: 10.17804/2410-9908.2024.5.117-129

VERIFICATION OF PLASTIC STRAIN VALUES DURING OVALIZATION OF A RING SPECIMEN FROM A FUEL ELEMENT SHELL OF A FAST NEUTRON REACTOR

R. P. Karagergi^{1, a, *}, A. V. Konovalov^{2, b}, and A. V. Kozlov^{3, c}

¹Research Institute of Nuclear Materials JSC,



p/o box 29, Zarechny, Sverdlovsk Region, 624250, Russia



²Institute of Engineering Science, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,


34 Komsomolskaya St., Ekaterinburg, 620049, Russia

³M. N. Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,

18 S. Kovalevskoy St., Ekaterinburg, 620137, Russia

a)  <https://orcid.org/0009-0004-1721-9575>  karagergi_rp@irmatom.ru;

b)  <https://orcid.org/0000-0001-9131-8636>  avkonovalov@mail.ru;

c)  sashok-k48@mail.ru

*Corresponding author. Email: karagergi_rp@irmatom.ru

Address for correspondence: p/o box 29, Zarechny, Sverdlovsk Obl., 624250, Russia

Tel.: +7 (343) 773-5286

Mechanical testing of ring specimens for radial compression between flat dies (ovalization) was carried out, supplemented by analyzing the stress-strain state calculated by a specialized computer program. To verify the values of plastic strain, laser marks were made on the side surface of the ring. It is found that the maximum plastic deformation accumulates at the inner and outer walls of the ring, where maximum tensile and compressive stresses act, respectively. The deviation of the experimental values of plastic strain from the predicted ones does not exceed 10%. It is shown that the analysis of the stress-strain state of the ring specimen during ovalization can be useful for evaluating the critical values of the mechanical characteristics of the shell material irradiated in a fast neutron reactor to a high damaging dose.

Keywords: fuel rod element shell, austenitic steel, mechanical tests, ring sample, stress-strain state, grid method

Acknowledgment

The work was performed under the state assignment from the Russian Ministry of Science and Higher Education (theme Structure, No. 122021000033-2), the state assignment for the IES UB RAS, R&D No. 124020600042-9, and the program of the Rosatom State Nuclear Energy Corporation on increasing the maximum fuel burnup in the fuel assemblies of fast neutron reactors.

References

1. Barsanova, S.V., Kozlov, A.V., and Shilo, O.B. The effect of fast neutron irradiation on changes in the mechanical properties of austenitic steels EK-164 and ChS-68. *Voprosy Atomnoy Nauki i Tekhniki. Seriya Materialovedenie i Novye Materialy*, 2018, 5 (96), 4–12. (In Russian).
2. Garner, F.A. Radiation damage in austenitic steels. *Comprehensive Nuclear Materials*, 2012, 4, 33–95. DOI: 10.1016/b978-0-08-056033-5.00065-3.
3. Arsène, S. and Bai, J. A new approach to measuring transverse properties of structural tubing by a ring test – experimental investigation. *Journal of Testing and Evaluation*, 1998, 26 (1), 26–30. DOI: 10.1520/JTE11966J.



4. Grigoriev, V., Jakobsson, R., Josefsson, B., and Schrire, D. Advanced techniques for mechanical testing of irradiated cladding materials. In: *Advanced Post-Irradiation Examination Techniques for Water Reactor Fuel: Proceedings of a Technical Committee Meeting*, Dimitrovgrad, Russian Federation, 14–18 May 2001, IAEA, 2002, pp. 187–193.
5. Cohen, A.B., Majumdar, S., Ruther, W.E., Billone, M.C., Chung, H.M., and Neimark, L.A. Modified ring stretch tensile testing of Zr–1Nb cladding. In: *Summary of paper for 25th Water Reactor Safety Information Meeting*, NRC Office of Nuclear Regulatory Research, Bethesda, Maryland, October 20–22 1997, Energy Technology Division, Argonne National Laboratory, 1997.
6. Daum, R.S., Majumdar, S., Tsai, H., Bray, T.S., Koss, D.A., Motta, A.T., and Billone, M.C. Mechanical property testing of irradiated Zircaloy cladding under reactor transient conditions. In: *Small Specimen Test Techniques*, Fourth Volume, ASTM STP 1418, M.A. Sokolov, J.D. Landes, and G.E. Lucas, eds., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 2002. Available at: https://www.researchgate.net/publication/255271057_Mechanical_property_testing_of_irradiated_Zircaloy_cladding_under_reactor_transient_conditions
7. Desquines, J., Koss, D.A., Motta, A.T., Cazalis, B., and Petit, M. The issue of stress state during mechanical tests to assess cladding performance during a reactivity-initiated accident (RIA). *Journal of Nuclear Materials*, 2011, 412 250–267. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2011.03.015.
8. Leontieva-Smirnova, M.V., Kalin, B.A., Morozov, E.M., Kostyukhina, A.V., Fedotov, P.V., and Taktashev, R.N. Methodical peculiarities of the ring specimens tensile tests. *Fizika i Khimiya Obrabotki Materialov*, 2019, 6, 62–71. (In Russian). DOI: 10.30791/0015-3214-2019-6-62-71.
9. Gurovich, B.A., Frolov, A.S., and Fedotov, I.V. Improved evaluation of ring tensile test ductility applied to neutron irradiated 42XNM tubes in the temperature range of (500–1100)°C. *Nuclear Engineering and Technology*, 2020, 52 (6), 1213–1221. DOI: 10.1016/j.net.2019.11.019.
10. Leontyeva-Smirnova, M.V., Izmalkov, I.N., Valitov, I.R., Loshmanov, L.P., Kostyukhina, A.V., and Fedotov, P.V. Determination of the yield strength of EK–181 steel during tensile tests of ring specimens. *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov*, 2016, 82 (10), 56–61. (In Russian).
11. Karagergi, R.P., Evseev, M.V., and Kozlov, A.V. Distribution of plastic deformation along the perimeter of circular specimen of thin-wall fuel-element cladding during its expansion. *Materials Physics and Mechanics*, 2021, 47 (1), 74–88. DOI: 10.18149/MPM.4712021_8.
12. Martin-Rengel, M.A., Gómez Sánchez, F.J., Ruiz-Hervías, J., and Caballero, L. Determination of the hoop fracture properties of unirradiated hydrogen-charged nuclear fuel cladding from ring compression tests. *Journal of Nuclear Materials*, 2013, 436 (1–3), 123–129. DOI: 10.1016/j.jnucmat.2013.01.311.
13. Herb, J., Sievers, J., and Sonnenburg, H.-G. A new cladding embrittlement criterion derived from ring compression tests. *Nuclear Engineering and Design*, 2014, 273, 615–630. DOI: 10.1016/j.nucengdes.2014.03.047.
14. Desquines, J. and Guilbert, S. Effect of an oxide layer on the result of a ring compression test on a fuel cladding sample after a simulated LOCA transient. In: *Top Fuel*, Prague, Czech Republic, October 1–4 2018: proceedings of conference. Available at: https://www.researchgate.net/publication/328496506_EFFECT_OF_AN_OXIDE_LAYER_ON_THE_RESULT_OF_A_RING_COMPRESSION_TEST_ON_A_FUEL_CLADDING_SAMPLE_AFTER_A_SIMULATED_LOCA_TRANSIENT
15. Frolov, A.S., Fedotov, I.V., and Gurovich, B.A. Evaluation of the true-strength characteristics for isotropic materials using ring tensile test. *Nuclear Engineering and Technology*, 2021, 53 (7), 2323–2333. DOI: 10.1016/j.net.2021.01.033.
16. Karagergi, R.P., Konovalov, A.V., Evseev, M.V., and Kozlov, A.V. Construction of a strain-hardening diagram to analyze the state of stress in the fuel-element cladding material. *Russian Metallurgy (Metally)*, 2023, 2023, 1528–1534. DOI: 10.1134/S0036029523100117.



17. Karagergi, R.P., Kozlov, A.V., Yarkov, V.Yu., Pastukhov, V.I., Barsanova, S.V., Churyumova, T.A., Mitrofanova, N.M., and Leontyeva-Smirnova, M.V. Microstructure of fracture surfaces after radial compression of annular specimens made of cladding austenitic steel exposed to damaging dose above 100 dpa. *Physics of Metals and Metallography*, 2024, 125 (6), 665–672. DOI: 10.1134/S0031918X2460043X.
18. Konovalov, A.V. and Partin, A.S. RF Software Registration Certificate No. 2023660789, 2020. (In Russian).



Подана в журнал: 23.07.2024
УДК 620.17
DOI: 10.17804/2410-9908.2024.5.117-129



ВЕРИФИКАЦИЯ ЗНАЧЕНИЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ОВАЛИЗАЦИИ КОЛЬЦЕВОГО ОБРАЗЦА ИЗ ОБОЛОЧКИ ТВЭЛА РЕАКТОРА НА БЫСТРЫХ НЕЙТРОНАХ



Р. П. Карагерги^{1, а, *}, А. В. Коновалов^{2, б}, А. В. Козлов^{3, в}


¹Акционерное общество «Институт реакторных материалов»,
а/я 29, г. Заречный, Свердловская обл., 624250, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения имени Э. С. Горкунова Уральского отделения Российской Академии Наук,
ул. Комсомольская, 34, г. Екатеринбург, 620049, Россия

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физики металлов имени М. Н. Михеева Уральского отделения Российской Академии Наук,
ул. Софьи Ковалевской, 18, г. Екатеринбург, 620137, Россия

a)  <https://orcid.org/0009-0004-1721-9575>  karagergi_rp@irmatom.ru;

b)  <https://orcid.org/0000-0001-9131-8636>  avkonovlov@mail.ru;

c)  sashok-k48@mail.ru

*Ответственный автор. Электронная почта: karagergi_rp@irmatom.ru
Адрес для переписки: а/я 29, г. Заречный, Свердловская обл., 624250, Россия
Тел.: +7 (343) 773-52-86

Проведены механические испытания на сжатие кольцевых образцов плоскими бойками в радиальном направлении (овализация образцов), дополненные анализом напряженно-деформированного состояния, рассчитанного по специализированной компьютерной программе. Для верификации значений пластической деформации использовали метки, нанесенные лазером на боковую поверхность кольца. Установлено, что максимальная пластическая деформация накапливается у внутренней и наружной стенок кольца, где действуют, соответственно, максимальные растягивающие и сжимающие напряжения. Расхождение экспериментальных и расчетных значений мер пластической деформации не превышает 10 %. Показано, что анализ напряженно-деформированного состояния кольцевого образца при овализации может быть полезен для оценки критических значений механических характеристик материала оболочки, облученной в реакторе на быстрых нейтронах до большой повреждающей дозы.

Ключевые слова: оболочка твэла, аустенитная сталь, механические испытания, кольцевой образец, напряженно-деформированное состояние, метод сеток

1. Введение

Оболочки твэлов являются важным элементом безопасности ядерных энергетических установок. При эксплуатации в активной зоне реактора они подвергаются длительному нейтронному облучению, влиянию высоких температур, воздействию коррозионной среды теплоносителя и топливной композиции. Как следствие, в материале наблюдаются существенные структурно-фазовые изменения, химические превращения, коррозионные повреждения, происходит распухание и формоизменение оболочек. Все это значительно меняет эксплуатационные характеристики твэлов в составе тепловыделяющих сборок (ТВС). В частности, у оболочки твэла реактора типа БН пластичность может снижаться вплоть до «нулевых» значений [1, 2]. Поэтому для подтверждения безопасных сроков эксплуатации

ТВС различного назначения одним из важнейших этапов является оценка механических характеристик оболочки твэла.

Типичные кратковременные механические свойства (пределы прочности и текучести, относительное удлинение) оболочек твэлов можно определить с помощью методики растяжения кольцевых образцов на опорах (рис. 1). Такая форма образцов не стандартизирована, но ее использование позволяет сэкономить количество материала и получить необходимую статистическую информацию о свойствах оболочки на коротких участках твэла с приблизительно одинаковыми условиями облучения. На сегодняшний день для испытания кольцевых образцов единого подхода не выработано. Поэтому каждая доступная методика, по сути дела, является частным случаем, который применяют в исследованиях материалов оболочек твэлов конкретного типа ядерной энергетической установки.

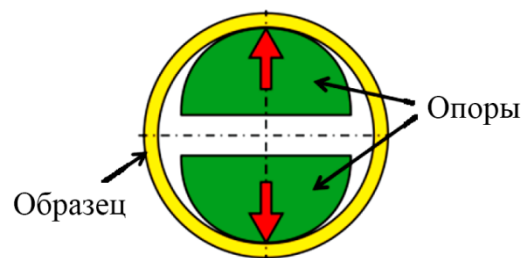


Рис. 1. Схема растяжения кольцевого образца на опорах

Например, за рубежом для определения механических свойств оболочек твэлов из циркониевых сплавов, применяемых в реакторах типа PWR, используется форма кольцевого образца с выделенными рабочими частями [3–6]. Такие образцы растягивают на цилиндрических опорах, диаметр которых равен внутреннему диаметру кольца. Для испытаний используют захваты с внутренней вставкой либо без таковой. Установлено [5], что при испытании образцов с помощью захватов без внутренней вставки достигаются более высокие значения относительного удлинения по сравнению с испытаниями образцов на конструкции со вставкой. Это связано с трением между внутренней поверхностью образца и поверхностью цилиндрической опоры, которое необходимо учитывать при интерпретации результатов испытаний. Для проверки значений степени пластической деформации сдвига и места локализации пластической деформации на поверхность выделенной части образца наносили метки, расстояние между которыми измеряли до и после испытания. Эта процедура показала, что значительная часть пластической деформации происходит на рабочих частях образца, а вне рабочих частей пластическая деформация практически не возникает [5, 6]. Несмотря на плюсы использования выделенных рабочих участков в данном типе кольцевых образцов, в некоторых случаях для облученного материала оболочки наблюдается ограниченная применимость такого способа испытания [7].

В отечественной практике используется обычная схема растяжения кольцевого образца на полуцилиндрических опорах, диаметр которых, в зависимости от геометрических параметров образца, на 65–95 % меньше, чем внутренний диаметр образца [8–11]. Данная схема испытания характеризуется наличием изгиба рабочих частей в начале испытания. На этой стадии кольцевой образец охватывает опоры и принимает овальную форму (овализуется). При овализации неконтролируемые деформации и напряжения локализуются на отдельных участках, что вносит ошибку в определение механических свойств, тем большую, чем меньше пластичность исследуемого материала. Были предприняты попытки экспериментально оценить значения пластической деформации на стадии изгиба рабочей части образца при его растяжении. Например, в работе [9] приведено испытание кольца из сплава 42ХНМ (реакторы типа ВВЭР) и установлено, что при смещении подвижной опоры в диапазоне от 0,5 до 1,0 мм уже наблюдается остаточная пластическая деформация. К подобному выводу пришли ав-



торы работы [10] при исследовании предела текучести оболочки из 12-процентной хромистой стали ЭК-181. Конкретно для образцов из аустенитной стали ЧС-68 (реакторы типа БН) определили [11], что истинная остаточная деформация, накопленная при изгибе рабочих частей образца, может составлять 1,4 %, что может быть критическим уровнем для испытания облученных кольцевых образцов.

При испытании образцов из оболочек с «нулевой» пластичностью материала, то есть после облучения в реакторе, способ растяжения кольцевых образцов требует специальной доработки. Это связано с главной проблемой данной методики – преждевременным разрушением кольца на начальной стадии испытания. Причина кроется в том, что на этой стадии имеющийся ресурс пластичности быстро исчерпывается, и записывается неинформативная диаграмма испытания. Обычный способ обработки полученных кривых растяжения не позволяет корректно определить предел прочности и относительное удлинение [7, 9, 11].

Перспективным способом решения данной проблемы является испытание кольцевого образца на сжатие плоскими бойками в радиальном направлении. При этом экспериментальные результаты дополнительно сопровождаются анализом напряженно-деформированного состояния (НДС) образца в процессе испытания. В этом случае для оценки предельного состояния материала и конструкции может выступать совокупность главных напряжений и деформаций, которые наблюдаются в ходе анализа НДС. Достоверность значений при таком подходе обеспечивается путем использования дополнительной экспериментальной информации в виде диаграммы деформационного упрочнения, применения реальных значений характеристик упругости, а также за счет косвенной проверки расчетов нагружения конечно-элементных моделей. Например, данный способ нашел применение при оценке остаточного ресурса пластичности оболочек твэлов из циркониевых сплавов реакторов PWR в аварийных условиях, а именно при высокотемпературном окислении циркониевой оболочки твэла из-за потери теплоносителя (авария типа LOCA), приводящем к охрупчиванию материала оболочки твэла [12–14]. Подобный подход позволил оценить характеристики сплава 42ХНМ после облучения до 15 сна при температуре облучения 300–350 °С [15].

Реакторы типа БН отличаются более жестким спектром нейтронного облучения и более высокой температурой облучения оболочек по сравнению с реакторами типа ВВЭР (PWR). Особенностью является то, что на метровой длине активной части твэла температура оболочки изменяется на 200–300 °С, а флюенс нейтронов – более чем в два раза. Это приводит к формированию коротких участков с однородными условиями облучения, что осложняет послереакторные материаловедческие исследования. Их длина варьируется приблизительно в диапазоне от 20 до 40 мм, поэтому для механических испытаний кольцевые образцы являются очень практичными. Применительно к оболочкам твэла реактора БН-600 в АО «ИРМ» разработан комбинированный способ испытания кольцевых образцов высотой 2,5 мм. Подобный размер является оптимальным для оценки свойств оболочки на таких коротких участках твэла. Метод включает в себя проведение двух последовательных операций с одним образцом: сжатие кольца в радиальном направлении (далее – процедура овализации кольца) и последующее растяжение на опорах. Полученные экспериментальные результаты сопровождаются анализом НДС образца с учетом накопленной пластической деформации при его формоизменении во время овализации. С помощью этого подхода идентифицированы параметры кривой упрочнения до больших пластических деформаций необлученных образцов при низкой и высокой температурах испытания [16]. Также методика радиального сжатия была применена в исследовании образцов из центрального участка твэла, облученного до повреждающей дозы более 100 сна [17]. Было показано, что характер разрушения является следствием радиационно-индуцированных изменений микроструктуры, приводящих к сильному снижению пластичности материала оболочки.

Так как комбинированный способ используется в послереакторных исследованиях оболочек твэлов реактора БН-600, то возникает вопрос применимости процедуры овализации

для кольцевых образцов из участков оболочки, облученной до больших значений повреждающей дозы. Для решения данной задачи надо провести оценку погрешности значений меры пластической деформации, рассчитываемой при конечно-элементном моделировании радиального сжатия кольцевого образца плоскими бойками.

Целью работы является верификация значений меры пластической деформации, а также оценка локализации деформации на отдельных участках рабочей части кольцевого образца при его сжатии плоскими бойками в радиальном направлении.

2. Материал и методика

Проводили механические испытания кольцевых образцов из аустенитной стали ЧС68-ИД (06X16H15M2Г2ТФР) 20 % х. д. в исходном состоянии. Кольца сжимали в радиальном направлении плоскими бойками (осуществляли овализацию образца), записывая при этом диаграммы испытания. Точность записи нагрузки и перемещения составляла 0,5 % и 1 % соответственно. Испытания проводили при комнатной температуре.

После овализации с помощью микрометра с точностью $\pm 0,01$ мм измеряли значения длины его полуосей (рис. 2). Измеренные значения сравнивали с расчетными значениями, полученными при конечно-элементном моделировании деформирования и формоизменения кольца с помощью компьютерной программы [18]. Данная программа позволяет моделировать овализацию кольцевого образца, его растяжение на полуцилиндрических опорах и растяжение образца на полуцилиндрических опорах после овализации.

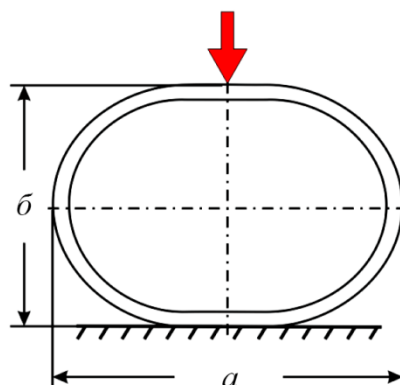


Рис. 2. Схема измерения габаритов кольцевого образца после овализации

В программе использована упругопластическая модель плоского деформированного состояния с малыми упругими и большими пластическими деформациями. При этом материал образца принимается изотропным и изотропно упрочняемым. Для анализа НДС использовали геометрические размеры кольца и квадратную сетку с размером ячеек 60×20 мкм. Такой размер ячеек был сопоставим со средним размером зерна исследуемого материала. Также задавали характеристики упругости материала образца: модуль Юнга и коэффициент Пуассона (табл. 1), диаграмму деформационного упрочнения, аппроксимированную функцией (1), и коэффициент трения образца с плоскими бойками, равный 0,1:

$$\sigma_s = \sigma_T(1 + a_1 \Lambda)^{a_2}, \quad (1)$$

где σ_s – сопротивление деформации, МПа; σ_T – предел текучести, МПа; a_1 и a_2 – коэффициенты аппроксимации.

Для оценки значений пластической деформации в области действия максимальных окружных растягивающих напряжений при данной схеме нагружения наносили метки с помощью лазерного маркера на боковую поверхность образца. Толщина меток была 20 мкм,

точность нанесения – ± 3 мкм. Положение меток было с внутренней стороны стенки кольцевого образца на расстоянии < 1 мкм от его поверхности (рис. 3). Расстояние между метками составляло $l_n = 0,266$ мм. На оптическом микроскопе с точностью 2 мкм осуществляли съемку изображений образца до и после испытания. Полученные изображения оцифровывали в графическом редакторе и проводили измерение расстояний между метками после овализации образца.

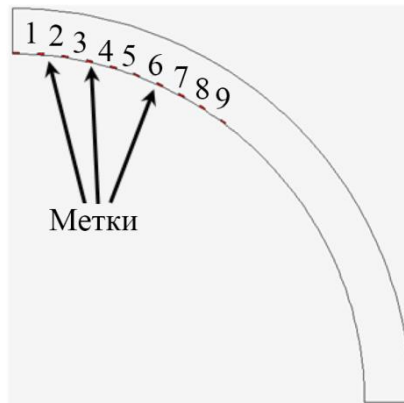


Рис. 3. Схема размещения меток на боковой поверхности кольцевого образца

В качестве меры пластической деформации в окружном направлении поперечного сечения кольцевого образца приняли величину относительного удлинения δ расстояния между метками, нанесенными на боковую поверхность образца,

$$\delta = \frac{l_k - l_n}{l_n} \cdot 100 \%, \quad (2)$$

где l_n и l_k – начальные и конечные значения расстояний между метками, мм.

В конечно-элементной компьютерной модели кольца использовали виртуальные метки, расстояния между которыми равнялись также $l_n = 0,266$ мм, а расстояние меток от внутренней стенки кольца составляло 1 мкм. Относительные значения удлинений δ между виртуальными метками вычисляли также по формуле (2). По этим данным определяли длину рабочего участка с действующими на нем максимальной деформацией и растягивающими напряжениями.

Таблица 1

Параметры кольцевых образцов для анализа напряженно-деформированного состояния

Параметры образца	Необлученный	Облученный
Наружный диаметр, мм	6,90	7,11
Толщина стенки, мм	0,400	0,406
Высота кольца, мм	2,40	2,36
Модуль упругости E , ГПа	200	170
Коэффициент Пуассона μ	0,350	0,307
Предел текучести σ_T , МПа	630	660
Коэффициент a_1	$1,65 \cdot 10^3$	95
Коэффициент a_2	0,05	0,13

Для апробации процедуры овализации использовали кольцевой образец, вырезанный из участка оболочки твэла, облученного в центре активной зоны реактора БН-600.

Материалом оболочки служила аустенитная сталь класса X16H19, повреждающая доза была более 100 сна, расчетная температура облучения – ~500 °С, набухание материала оболочки – ~6 %. По аналогии с необлученным образцом проводили радиальное сжатие этого образца, измерение его габаритов по изображению, полученному на сканирующем электронном микроскопе (СЭМ), анализ НДС с использованием своих экспериментально установленных физико-механических характеристик материала (см. табл. 1) и оценку δ по формуле (2) с помощью виртуальных меток в конечно-элементной компьютерной модели кольцевого образца. Полученные результаты сравнивали с результатами для необлученного образца.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Верификация значений пластической деформации

По полученным экспериментальным данным, наблюдается повторяемость результатов нагружения кольцевых образцов в радиальном направлении. Это видно по диаграммам испытания, которые накладываются друг на друга и хорошо совпадают с расчетной диаграммой, что говорит о корректности вычислений (рис. 4).

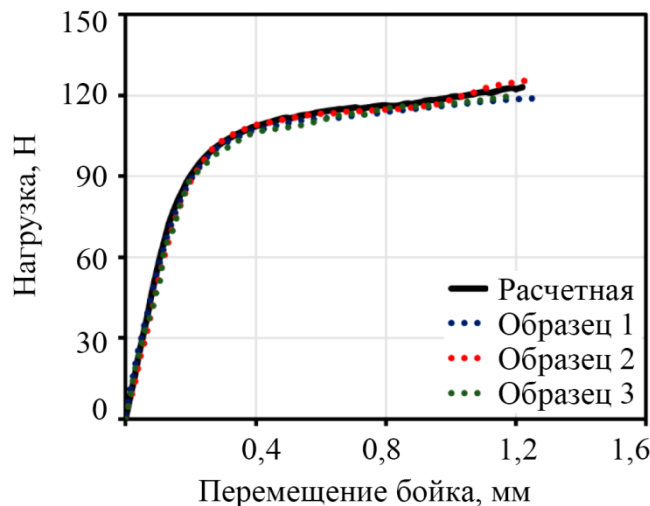


Рис. 4. Диаграммы радиального сжатия кольцевых образцов плоскими бойками

Таблица 2

Экспериментальные и расчетные значения габаритных размеров колец после процедуры овализации

Образец		Габариты, мм	
		<i>a</i>	<i>b</i>
Необлученные	Образец 1	7,90	5,71
	Образец 2	7,94	5,70
	Образец 3	7,91	5,73
	Среднее	7,92	5,71
	Расчетные	7,84	5,69
Облученный	Измеренные по изображению СЭМ	7,61	6,23
	Расчетные	7,64	6,44

Из сопоставления значений прямых измерений габаритов колец после овализации с расчетными следует, что вычисления формоизменения кольцевого образца по компьютерной

программе [18] выполняются корректно. Относительная разница размеров не превышает 1 % (табл. 2).

Конечно-элементный анализ НДС показывает, что пластическая деформация неравномерно распределяется по толщине стенки кольцевого образца. В области действия плоского бойка максимальная степень пластической деформация сдвига Λ наблюдается с внутренней части кольца (рис. 5).

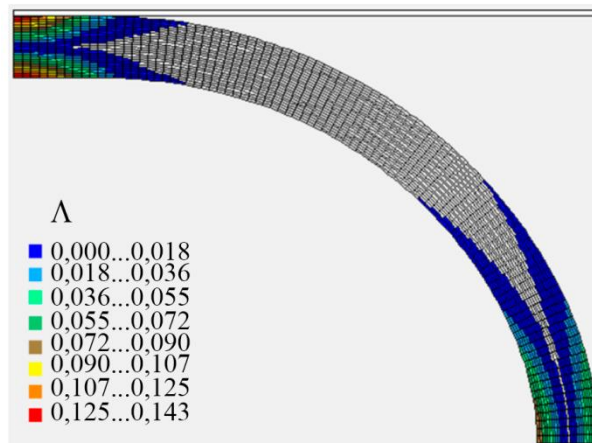


Рис. 5. Распределение значений степени пластической деформации сдвига Λ

По результатам измерения расстояний между виртуальными метками видно, что наибольшее удлинение происходит на участках 1–3 (табл. 3). Из этого можно сделать вывод, что для данной формы образца сумма этих участков будет являться своего рода рабочей базой с начальным значением, равным $l_0 = (0,798 \pm 0,004)$ мм. Участки 4–9 учитывать не будем. Таким образом, разница между экспериментальными и расчетными средними значениями удлинения $\delta_{ср.}$ может быть существенной, и в данном случае она составляет 23 % в относительном эквиваленте. Существенная разница связана с ошибкой измерения расстояний между метками ($\Delta = 15$ мкм), которая накапливается при масштабировании и оцифровке изображения. Отметим, что экспериментальные результаты $\delta_{ср.}$ оказались ниже расчетных, а максимальные растягивающие напряжения вдоль оси X на рассматриваемом участке варьруются в диапазоне $\sigma_{xx} = 955 \dots 1005$ МПа (рис. 6).

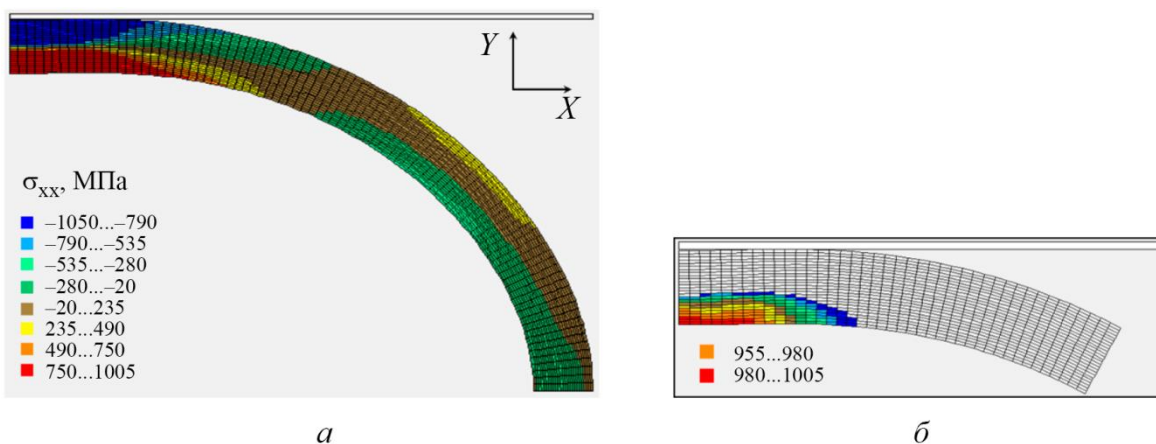


Рис. 6. Распределение рассчитанных напряжений вдоль оси X : распределение σ_{xx} по всему диапазону измерения (а); распределение σ_{xx} в диапазоне измерения 955...1005 МПа (б)

Таблица 3

Результаты измерения расстояний между метками и относительного удлинения

Номер участка между метками	Необлученный образец				Облученный образец	
	Экспериментальные значения		Расчетные значения		Расчетные значения	
	l_k , мм	δ , %	l_k , мм	δ , %	l_k , мм	δ , %
1	0,288	8,1	0,288	8,3	0,279	4,9
2	0,278	4,3	0,282	6,0	0,273	2,6
3	0,270	1,5	0,274	3,0	0,269	1,1
4	0,267	0,2	0,269	1,1	0,267	0,4
5	0,267	0,3	0,267	0,4	0,267	0,4
6	0,266	0,0	0,267	0,4	0,267	0,4
7	0,271	1,7	0,267	0,4	0,267	0,4
8	0,271	1,7	0,266	0,0	0,266	0,0
9	0,271	1,7	0,266	0,0	0,266	0,0
Среднее значение при $l_0 \approx 0,798$ мм	0,835	4,7	0,844	5,8	0,821	2,9

3.2. Результаты испытания облученного образца

При овализации облученного кольцевого образца произошло его разрушение, что хорошо фиксируется на диаграмме испытания в виде характерного падения нагрузки силоизмерительного датчика (рис. 7 а). В данном случае важным моментом является оценка критических значений напряжений и деформации, локализованных возле места разрушения. По результатам фрактографии излома установлено, что разрушение произошло преимущественно по радиационным порам, которые для оболочек из аустенитных сталей являются типичными структурными дефектами, вызванными облучением быстрыми нейтронами (рис. 7 б). Такое разрушение является характерным при испытании кольцевых образцов из облученных в реакторе БН-600 оболочек твэлов, изготовленных из аустенитной стали на хромоникелевой основе [17].

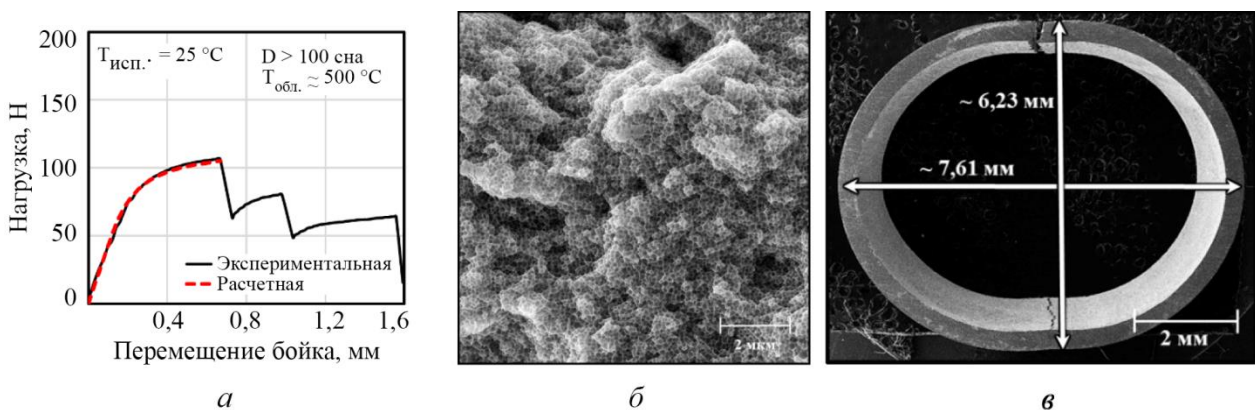


Рис. 7. Результаты процедуры овализации облученного образца: диаграмма радиального сжатия (а); радиационные поры на поверхности разрушения (б); габариты образца (в)

Трещина прошла от внутренней стенки к наружной, ее учитывали при измерении габаритов образца. Максимальная разница между расчетными габаритами и измеренными по изображению СЭМ получена для вертикального габарита b и составляет 3,2 %, а для горизонтального габарита a – меньше 0,5 % (рис. 7 в), что можно считать удовлетворительным, а



проведенный расчет корректным. Анализ НДС, выполненный до момента разрушения при перемещении давящего бойка на величину 0,67 мм, дает следующие результаты: максимальная степень пластической деформации сдвига $\Lambda = 0,096 \pm 0,010$ и диапазон максимальных напряжений $\sigma_{xx} = 910 \dots 1060$ МПа. Расчетное значение удлинения на рабочей базе l_0 облученного образца составило $\delta_{cp} = 2,9 \pm 0,7$ % с учетом относительной разницы, полученной ранее.

4. Заключение

При радиальном сжатии (овализации) плоскими бойками кольцевого образца из оболочки твэла максимальная пластическая деформация в области растягивающих окружных напряжений накапливается на оси симметрии под бойком с внутренней стороны стенки кольца, где растягивающие окружные напряжения максимальны. Результаты механических испытаний, проведенных измерений и конечно-элементного моделирования процесса овализации кольцевого образца демонстрируют удовлетворительную воспроизводимость экспериментальных результатов. Отклонения экспериментальных и рассчитанных при конечно-элементном моделировании значений выбранной в работе меры пластической деформации δ не превышает 10 %.

Показано, что при овализации кольцевого образца, изготовленного из облученной оболочки твэла, произошло его разрушение. Для оценки критических значений механических характеристик использованы результаты анализа напряженно-деформированного состояния, который сопровождал получение экспериментальных результатов.

Необходимо отметить, что представленную методику можно использовать в качестве дополнения к расчетным и экспериментальным результатам, полученным другими способами.

Благодарность

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема «Структура», № 122021000033-2), государственного задания ИМАШ УрО РАН № НИОКТР 124020600042-9 и Программы ГК «Росатом» по повышению предельного выгорания топлива ТВС реакторов на быстрых нейтронах.

Литература

1. Барсанова С. В., Козлов А. В., Шило О. Б. Влияние облучения быстрыми нейтронами на изменение механических свойств аустенитных сталей ЭК–164 и ЧС–68 // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. – 2018. – № 5 (96). – С. 4–12.
2. Garner F. A. Radiation damage in austenitic steels // Comprehensive Nuclear Materials. – 2012. – Vol. 4. – P. 33–95. – DOI: 10.1016/b978-0-08-056033-5.00065-3.
3. Arsène S., Bai J. A new approach to measuring transverse properties of structural tubing by a ring test – experimental investigation // Journal of Testing and Evaluation. – 1998. – Vol. 26 (1). – P. 26–30. – DOI: 10.1520/JTE11966J.
4. Advanced techniques for mechanical testing of irradiated cladding materials / V. Grigoriev, R. Jakobsson, B. Josefsson, D. Schrire // Advanced Post-Irradiation Examination Techniques for Water Reactor Fuel : proceedings of a Technical Committee Meeting, Dimitrovgrad, Russian Federation, 14–18 May, 2001. – IAEA, 2002. – P. 187–193.
5. Modified ring stretch tensile testing of Zr–1Nb cladding / A. B. Cohen, S. Majumdar, W. E. Ruther, M. C. Billone, H. M. Chung, L. A. Neimark // Summary of Paper for 25th Water Reactor Safety Information Meeting, NRC Office of Nuclear Regulatory Research, Bethesda, Maryland, October 20–22, 1997. – Energy Technology Division, Argonne National Laboratory, 1997.
6. Mechanical property testing of irradiated Zircaloy cladding under reactor transient conditions / R. S. Daum, S. Majumdar, H. Tsai, T. S. Bray, D. A. Koss, A. T. Motta, M. C. Billone // Small Specimen Test Techniques. ASTM STP 1418 : Fourth Volume, / ed. by M. A. Sokolov, J. D. Landes, G. E. Lucas. – West Conshohocken : American Society for



Testing and Materials, PA, 2002. – URL : https://www.researchgate.net/publication/255271057_Mechanical_property_testing_of_irradiated_Zircaloy_cladding_under_reactor_transient_conditions

7. The issue of stress state during mechanical tests to assess cladding performance during a reactivity-initiated accident (RIA) / J. Desquines, D. A. Koss, A. T. Motta, B. Cazalis, M. Petit // Journal of Nuclear Materials. – 2011. – Vol. 412. – P. 250–267. – DOI: 10.1016/j.jnucmat.2011.03.015.

8. Методические особенности испытаний на растяжение кольцевых образцов / М. В. Леонтьева-Смирнова, Б. А. Калинин, Е. М. Морозов, А. В. Костюхина, П. В. Федотов, Р. Н. Такташев // Физика и химия обработки материалов. – 2019. – № 6. – С. 62–71. – DOI: 10.30791/0015-3214-2019-6-62-71.

9. Gurovich B. A., Frolov A. S., Fedotov I. V. Improved evaluation of ring tensile test ductility applied to neutron irradiated 42XNM tubes in the temperature range of (500–1100)°C // Nuclear Engineering and Technology. – 2020. – Vol. 52 (6). – P. 1213–1221. – DOI: 10.1016/j.net.2019.11.019.

10. Определение предела текучести стали ЭК–181 при испытаниях на растяжение кольцевых образцов / М. В. Леонтьева-Смирнова, И. Н. Измалков, И. Р. Валитов, Л. П. Лошманов, А. В. Костюхина, П. В. Федотов, Г. Х. Мурзаханов, А. В. Баскаков // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2016. – Т. 82 (10). – С. 56–61.

11. Karagergi R. P., Evseev M. V., Kozlov A. V. Distribution of plastic deformation along the perimeter of circular specimen of thin-wall fuel-element cladding during its expansion // Materials Physics and Mechanics. – 2021. – Vol. 47 (1). – P. 74–88. – DOI: 10.18149/MPM.4712021_8.

12. Determination of the hoop fracture properties of unirradiated hydrogen-charged nuclear fuel cladding from ring compression tests / M. A. Martin-Rengel, F. J. Gómez Sánchez, J. Ruiz-Hervías, L. Caballero // Journal of Nuclear Materials. – 2013. – Vol. 436 (1–3). – P. 123–129. – DOI: 10.1016/j.jnucmat.2013.01.311.

13. Herb J., Sievers J., Sonnenburg H. G. A new cladding embrittlement criterion derived from ring compression tests // Nuclear Engineering and Design. – 2014. – Vol. 273. – P. 615–630. – DOI: 10.1016/j.nucengdes.2014.03.047.

14. Desquines J., Guilbert S. Effect of an oxide layer on the result of a ring compression test on a fuel cladding sample after a simulated LOCA transient // Top Fuel, Prague, Czech Republic, 2018, October 1–4, 2018 : proceedings of conference. – URL: https://www.researchgate.net/publication/328496506_EFFECT_OF_AN_OXIDE_LAYER_ON_THE_RESULT_OF_A_RING_COMPRESSION_TEST_ON_A_FUEL_CLADDING_SAMPLE_AFTER_A_SIMULATED_LOCA_TRANSIENT

15. Frolov A. S., Fedotov I. V., Gurovich B. A. Evaluation of the true-strength characteristics for isotropic materials using ring tensile test // Nuclear Engineering and Technology. – 2021. – Vol. 53 (7). – P. 2323–2333. – DOI: 10.1016/j.net.2021.01.033.

16. Construction of a strain-hardening diagram to analyze the state of stress in the fuel-element cladding material / R. P. Karagergi, A. V. Konovalov, M. V. Evseev, A. V. Kozlov // Russian Metallurgy (Metally). – 2023. – Vol. 2023. – P. 1528–1534. – DOI: 10.1134/S0036029523100117.

17. Microstructure of fracture surfaces after radial compression of annular specimens made of cladding austenitic steel exposed to damaging dose above 100 dpa / R. P. Karagergi, A. V. Kozlov, V. Yu. Yarkov, V. I. Pastukhov, S. V. Barsanova, T. A. Churyumova, N. M. Mitrofanova, M. V. Leontyeva-Smirnova // Physics of Metals and Metallography. – 2024. – Vol. 125 (6) – P. 665–672. – DOI: 10.1134/S0031918X2460043X.

18. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2020612158 Рос. Федерация. Программа конечно-элементного моделирования растяжения овального образца на полумонолитных опорах : № 2020611060 : регистрация 04.02.2020 : опублик. 18.02.2020 / Коновалов А. В., Партин А. С.