

Received: 26.02.2026

Revised: 21.05.2026

Accepted: 05.06.2026

DOI: 10.17804/2410-9908.2026.3.116-139

A COMBINED METHOD FOR THE MECHANICAL TESTING OF RING SPECIMENS FROM THE FUEL ELEMENT CLADDING 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. B. 29, Zarechny, Sverdlovsk Oblast, 624250, Russia

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

34 Komsomolskaya St., Ekaterinburg, 620049, Russia

³Institute 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 Oblast, 624250, Russia

Tel.: +7 (343) 773-5286

To assess the condition the fuel element cladding of a nuclear reactor after operation, mechanical tensile testing of ring specimens is performed as part of post-irradiation studies. The specimen shapes and loading methods used in domestic studies differ significantly from those used in studies abroad. When irradiated specimens with low material ductility are tested, premature specimen failure results in a loss of information about the cladding properties, this being a common problem for testing ring specimens. The fuel rod cladding of the BN-600 reactor is used as an example to present a combined method including preliminary ring ovalization and subsequent stretching on semi-cylindrical supports. It is shown that the ovalization procedure allows one to prepare the gauge parts of the ring specimen prior to subsequent tensile testing. Furthermore, the stress-strain state of the specimen in its gauge part promotes a symmetric distribution of plastic strain across the specimen wall thickness. This leads to a more correct evaluation of the ductility and strength characteristics of fuel element cladding materials.

Keywords: fuel element cladding, ring specimen, plastic deformation, mechanical properties, stress-strain state, combined method

Acknowledgment

The research was performed under Rosatom's program on increasing maximum fuel burnup in the fuel assemblies of fast neutron reactors, the state assignment from the Russian Ministry of Science and Higher Education for the IES UB RAS (R&D No. 124020600042-9), and the state assignment from the Russian Ministry of Science and Higher Education for the IMP UB RAS.

References

1. Arsene, S. and Bai, J. A new approach to measuring transverse properties of structural tubing by a ring test. *Journal of Testing and Evaluation*, 1996, 24 (6), 386–391.
2. Macdonald, V., Le Boulch, D., De Menibus, A.H., Besson, J., Auzoux, Q., Crépin, J., and Le Jolu, T. Fracture of Zircaloy-4 fuel cladding tubes with hydride blisters. *Procedia Materials Science*, 2014, 3, 233–238. DOI: 10.1016/j.mspro.2014.06.041.

3. Hamanishi, E. True stress vs true strain analysis with results of ring tensile tests. In: *Fuel Safety Research Meeting*, Tokai, Japan, 2006.
4. Bae, B.-K., Cho, S.-K., and Seok, C.-S. A study on ring tensile specimens. *Materials Science and Engineering: A*, 2008, 483–484, 248–250. DOI: 10.1016/j.msea.2006.10.203.
5. Billone, M.C., Chung, H.M., Cohen, A.B., Majumdar, S., Neimark, L.A., and Ruther, W.E. Modified ring stretch tensile testing of Zr-1Nb cladding. In: *Proc. 25th Water Reactor Safety Information Meeting*, Bethesda, MD, October 20–22, 1997, Washington, DC: US Nucl. Regul. Com., 1997, No. 8127. Available at: <https://www.osti.gov/servlets/purl/8127>
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. 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.
8. Josefsson, B., and Grigoriev, V. Modified ring tensile testing and a new method for fracture toughness testing of irradiated cladding. *Studsvik Material AB*, S-61182, Nyköping, Sweden, May 22, 1996.
9. Király, M., Antók, D.M., Horváth, L., and Hózer, Z. Evaluation of axial and tangential ultimate tensile strength of zirconium cladding tubes. *Nuclear Engineering and Technology*, 50 (3), 425–431. DOI: 10.1016/j.net.2018.01.002.
10. Loshmanov, L.V., Fedotov, P.V., Salatov, A.V., Nechaeva, O.A., and Smirnov, N.V. Specimen for studying the mechanical properties and deformation behavior of the fuel-element cladding material of a VVER reactor in the tangential direction. In: *Nauchnaya sessiya MIFI-2007 [Unconventional Power Engineering. Nuclear Power Engineering : Collection of Scientific Works]*. MIFI Publ., Moscow, 2007, vol. 8, pp. 141–143. (In Russian).
11. Leontieva-Smirnova, M.V., Kaplin, 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.
12. 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).
13. Frolov, A.S. and Fedotov, I.V. Methodology of mechanical testing for fuel rod cladding materials of Russian. *Voprosy Atomnoy Nauki i Tekhniki. Seriya Fizika Yadernykh Reaktorov*, 2024, 5, 75–97. (In Russian).
14. 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.
15. Karagergi R.P., Evseev M.V., and Kozlov A.V. Determination of the deformation deceleration coefficient for calculating the initial effective length of the working part of an annular specimen made of fuel cladding. *Zavodskaya Laboratoriya. Diagnostika Materialov*, 2022, 88 (4), 33–41. (In Russian). DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-4-33-41.
16. 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.

17. 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.
18. 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.
19. Portnykh, I.A., Panchenko, V.L., Ustinov, A.E., and Kozlov, A.V. The evolution of the microstructure of Cr16–Ni19 steel under irradiation in the low enrichment zone of a fast neutron reactor. Formation and development of radiation porosity. *Physics of Metals and Metal Science*, 2025, 126 (1), 98–109. (In Russian). DOI: 10.31857/S0015323025010104.
20. Panchenko, V.L., Portnykh, I.A., and Ustinov, A.E. The evolution of the microstructure of Cr16–Ni19 steel under irradiation in the low enrichment zone of a fast neutron reactor. The effect of neutron irradiation conditions on the structural and phase state. *Physics of Metals and Metal Science*, 2025, 126 (1), 110–122. DOI: 10.31857/S0015323025010119.
21. Karagergi, R.P., Kozlov, A.V., Shilo, O.B., Barsanova, S.V., and Portnykh, I.A. Methods for short-term mechanical testing of fuel element cladding specimens with stress-strain state analysis. *Fizicheskaya mezhmekhanika. Materialy s mnogourovnevnoy ierarkhicheski organizovannoy srukturoy i intellektualnye proizvodstvennye tekhnologii* [Physical Mesomechanics. Materials with a Multilevel Hierarchically Organized Structure and Intelligent Manufacturing Technologies: International Conference Abstracts]. Tomsk, September 11–14, 2023. IFPM SO RAN Publ., Tomsk, 2023, 135–136. (In Russian).
22. 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.
23. 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
24. 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.
25. 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.
26. Frolov, A. S. and Fedotov, I. V. Comparison of ring tension and compression test results for materials with low ductility. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2024, 6, 62–90. DOI: 10.17804/2410-9908.2024.6.062-090. Available at: http://dream-journal.org/issues/2024-6/2024-6_465.html
27. Karagergi, R.P., Konovalov, A.V., and Kozlov, A.V. Verification of plastic strain values during ovalization of a ring specimen from a fuel element shell of a fast neutron reactor. *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*, 2024, 5, 117–129. DOI: 10.17804/2410-9908.2024.5.117-129. Available at: http://dream-journal.org/issues/2024-5/2024-5_484.html
28. 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, 665–672. DOI: 10.1134/S0031918X2460043X.

29. Karagergi, R.P., Portnykh, I.A., Konovalov, A.V., Baranova, S.V., and Kozlov, A.V. Assessment of plasticity and damage of material of fuel element shells irradiated with fast neutrons. *Physics of Metals and Metal Science*, 2025, 126 (4), 470–481. DOI: 10.31857/S00153230250408e6.

30. Spitsyn, E.V., Tselishchev, A.V., and Budanov, U.P. Investigation of influence of the austenization annealing regimes on structural state and characteristics of long-term strength and creep of cladding tubes from austenitic steel ChS68-ID. *Voprosy Atomnoy Nauki i Tekhniki. Seriya Materialovedenie i Novye Materialy*, 2015, 2 (81), 4–14. (In Russian).

31. Konovalov, A.V. and Partin, A.S. RF Software Registration Certificate No. 2020612158, 2020.

32. Mitrofanova, N.M. and Churyumova, T.A. EK164 steel as a structural fuel rods cladding material for fast sodium reactors. *Voprosy Atomnoy Nauki i Tekhniki. Seriya Materialovedenie i Novye Materialy*, 2019, 2 (98), 100–109. (In Russian).

33. Bogatov, A.A., Mizhiritsky, O.I., and Smirnov, S.V. *Resurs plastichnosti metallov pri obrabotke davleniem* [Metal Plasticity Resource Under Metal Forming]. Metallurgiya Publ., Moscow, 1984, 144 p. (In Russian).

34. Bobkov, V.P., Blokhin, A.I., Rumyantsev, V.N., Soloviev, V.A., and Tarasikov, V.P. *Spravochnik po svoystvam materialov dlya perspektivnykh reaktornykh tekhnologiy* [Handbook of Properties of Materials for Advanced Reactor Technologies. Vol. 5. Properties of Reactor Steels and Alloys]. IzdAT Publ., Moscow, 2014, 582 p. (In Russian).

Подана в журнал: 26.02.2026

УДК 620.17

DOI: 10.17804/2410-9908.2026.3.116-139

КОМБИНИРОВАННЫЙ СПОСОБ МЕХАНИЧЕСКИХ ИСПЫТАНИЙ КОЛЬЦЕВЫХ ОБРАЗЦОВ 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, д. 34, г. Екатеринбург, 620049, Россия

³Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт физики металлов имени М. Н. Михеева Уральского отделения Российской академии наук,
ул. С. Ковалевской, д. 18, г. Екатеринбург, 620137, Россия

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

^б  <https://orcid.org/0000-0001-9131-8636>  avkononvalov@mail.ru;

^в  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

Для оценки состояния оболочек твэлов ядерных реакторов после эксплуатации в рамках послереакторных исследований проводят механические испытания кольцевых образцов на растяжение. В зарубежной и отечественной практике подобных исследований формы образцов и способы их нагружения значительно отличаются. При испытании облученных образцов с низкой пластичностью материала из-за разрушения образца на начальной стадии опыта происходит потеря информации о свойствах оболочки, что является общей проблемой при испытании кольцевых образцов. На примере оболочки твэла реактора БН-600 представлен комбинированный способ, включающий в себя процедуру предварительной овализации кольца и его последующее растяжение на полуцилиндрических опорах. Показано, что процедура овализации позволяет подготовить рабочие части кольцевого образца перед его последующим испытанием на растяжение. При этом напряженно-деформированное состояние образца на рабочей части способствует симметричному распределению пластической деформации по толщине стенки образца. Это приводит к более корректной оценке характеристик пластичности и прочности материалов оболочек твэлов.

Ключевые слова: оболочка твэла, кольцевой образец, пластическая деформация, механические свойства, напряженно-деформированное состояние, комбинированный способ

1. Введение

В энергетических ядерных реакторах оболочки тепловыделяющих элементов (ТВЭлов) являются важным элементом безопасности. Они обеспечивают герметичность ТВЭлов на протяжении всего цикла использования тепловыделяющих сборок (ТВС): при транспортировке, эксплуатации и хранении после облучения. Условия эксплуатации ТВЭлов обуславливаются типом реактора и характеризуются воздействием нейтронного облучения при разной температуре, видом топливной композиции и химической активностью используемого теплоносителя. При эксплуатации в материалах оболочек ТВЭлов возникают радиационно-индуцированные дефекты, приводящие к деградации комплекса физико-механических свойств. В частности,

сильно снижается пластичность материала оболочки, что ограничивает ее деформационную способность, повышая риски разгерметизации твэла. Поэтому для оценки текущего состояния материалов оболочек и прогнозирования их ресурса эксплуатации необходимыми являются исследования механических свойств оболочек твэлов после эксплуатации. Экспериментальные исследования оболочек твэлов выполняют в специализированных корпусах защитных («горячих») камер с применением дистанционно управляемого оборудования. Экспертиза оболочек твэлов включает кратковременные механические испытания образцов различными способами нагружения, неразрушающий контроль и структурные исследования.

Одним из наиболее распространенных методов механических испытаний образцов из оболочек твэлов является метод растяжения кольцевых образцов на полуцилиндрических опорах [1–17]. Назовем этот вид испытаний традиционным способом растяжения. У пластичных материалов при таком способе растяжения по диаграммам испытаний определяются условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, предел прочности σ_b и относительное удлинение после разрыва δ . С этой целью проводят растяжение образцов различной формы, используя при этом разнообразную технологическую оснастку.

В силу разных методических аспектов в мировой практике послереакторных материаловедческих исследований не сложилось единого мнения о правильности использования способов растяжения кольцевых образцов. Например, Французским агентством по атомной энергии [1, 2], Агентством по атомной энергии Японии и Государственным научно-исследовательским институтом атомной энергии Кореи [3, 4], Аргоннской национальной лабораторией (США) [5, 6] и институтом Studsvik Nuclear в Швеции [7, 8] используется форма кольцевого образца с выделенными рабочими частями. Причем образцы нагружают в различных вариантах размещения кольца на технологической оснастке (рис. 1) [9].

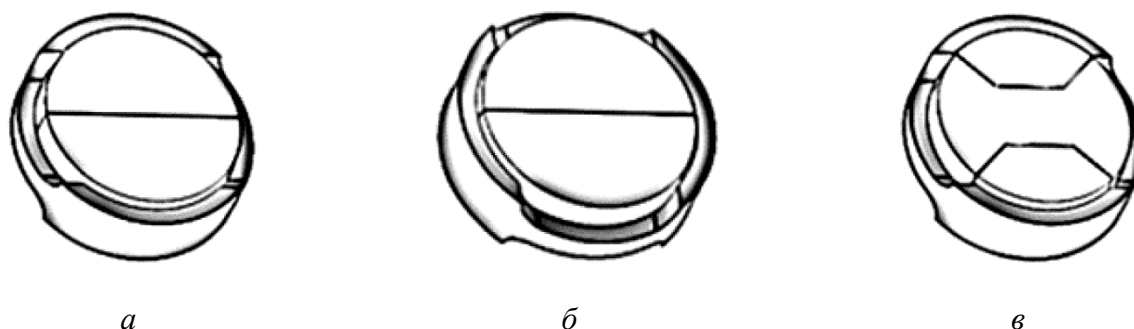


Рис. 1. Схемы испытания кольцевого образца: Французское агентство по атомной энергии (а); Агентство по атомной энергии Японии и Государственный научно-исследовательский институт атомной энергии Кореи (б); Аргоннская национальная лаборатория в США и институт Studsvik Nuclear в Швеции (в)

В отечественной практике в основном используется обычная форма кольцевого образца, то есть без выделенных рабочих частей. Образец растягивают на полуцилиндрических опорах (рис. 2), диаметр которых, в зависимости от геометрических параметров образца, составляет 65–95 % от внутреннего диаметра кольца [10–17].

По сравнению с изготовлением образцов с выделенными рабочими частями в условиях «горячей» камеры, технология изготовления кольцевых образцов обычной формы из материалов оболочек твэлов с высокой наведенной активностью является более простой. Кроме того, на коротких участках оболочки твэла с одинаковыми условиями облучения это позволяет получить больше ценной информации о механических характеристиках облученного материала, чем при испытании образцов другого вида (например, сегментные образцы длиной от 30 мм или трубчатые образцы длиной 15 мм).

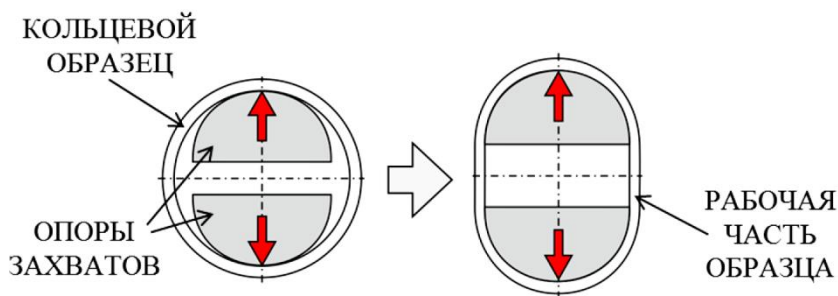


Рис. 2. Схема испытания кольцевого образца на полужилиндрических опорах традиционным способом растяжения

При растяжении кольцевых образцов из оболочек ТВЭЛов после длительной эксплуатации в некоторых случаях разрушение образца происходит или на начальном этапе растяжения (тогда результат — только сам факт разрушения), или через короткое время после вытяжки кольца. В таких случаях диаграммы растяжения имеют неинформативный вид, что затрудняет их интерпретацию для точного определения прочности и пластичности. Причиной этого являются неоднородные условия деформации образца на начальной стадии испытания при изгибе его рабочих частей. На этом этапе пластическая деформация неравномерно распределяется по периметру и толщине стенки кольца, основная ее часть накапливается с внутренней стороны стенки образца. Это приводит к реализации условий разрушения путем расклинивающего отрыва при полном исчерпании запаса пластичности материала. Такое деформационное поведение характерно для кольцевых образцов из материалов оболочек ТВЭЛов с большим количеством радиационных дефектов (дислокационные петли, поры, вторичные выделения и др.) и коррозионных повреждений в материалах оболочек ТВЭЛов. Радиационные дефекты являются причинами радиационного упрочнения и охрупчивания, приводящих к снижению пластических свойств материалов оболочек ТВЭЛов и, как следствие, к хрупкому разрушению образцов. Причем вне зависимости от типа исследуемого материала оболочки и температуры испытания различные авторы сталкиваются с этой проблемой при исследовании материалов оболочек ТВЭЛов разных типов реакторов (рис. 3) [16–18].

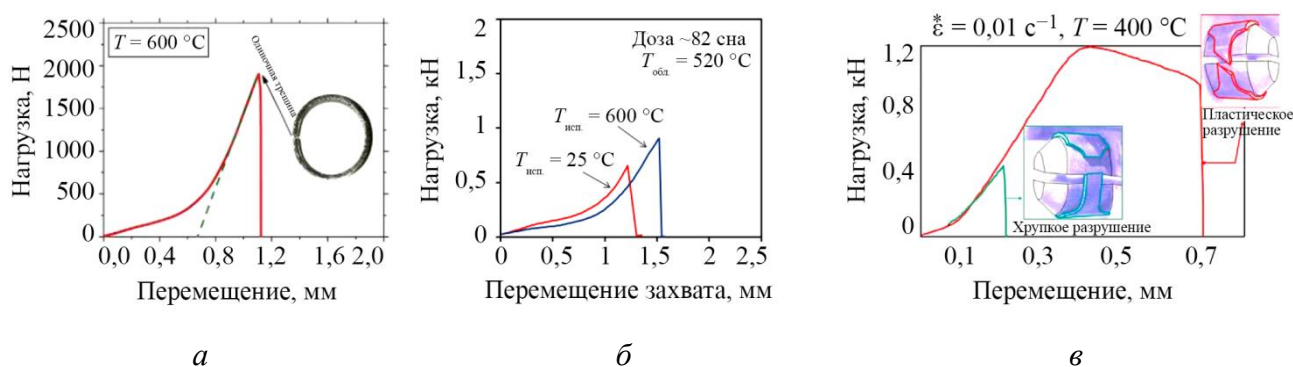


Рис. 3. Типичные диаграммы растяжения облученных кольцевых образцов с низкой пластичностью материала оболочек ТВЭЛов разных типов реакторов: а — сплав 42ХНМ (реакторная установка РИТМ-200 для атомных ледоколов) [16]; б — аустенитная хромоникелевая сталь (реактор БН-600) [17]; в — циркониевый сплав Zircaloy-4 (реактор PWR) [18]

По сравнению с водо-водяными энергетическими реакторами, где в качестве материалов оболочек применяются циркониевые сплавы, в активной зоне реакторов на быстрых нейтронах с натриевым теплоносителем (БН) оболочки ТВЭЛов из аустенитных хромоникеле-

вых сталей подвергаются более интенсивному нейтронному облучению и градиенту высоких температур. Как результат, по длине твэла в материале оболочки возникает неоднородная пористая структура с различными по химическому составу включениями вторых фаз, также сильно меняется дислокационная структура, появляются коррозионные повреждения [19, 20]. Активную часть твэла условно можно разделить на три участка: низ, центр и верх. В силу особенностей условий облучения на этих участках, структура материала оболочки на них существенно отличается, а длина сегментов с одинаковыми условиями облучения, на которых размеры и концентрация радиационных дефектов сильно не меняются, может составлять от 20 до 50 мм. В данном случае использование кольцевых образцов дает важную статистическую информацию о состоянии материала оболочки, которую используют для подтверждения работоспособности материала оболочки в различных режимах работы реактора. Однако при проведении механических испытаний на растяжение кольцевых образцов, вырезанных из оболочек твэлов после длительной эксплуатации в реакторе БН, из-за низкой пластичности материала результаты не подлежат четкой интерпретации. Поэтому с целью оценки работоспособности оболочек твэлов реактора БН-600 в АО «Институт реакторных материалов» (ИРМ) разработаны новые методики механических испытаний [21].

Одним из нововведений является комбинированный способ механических испытаний кольцевых образцов высотой 2,5 мм (рис. 4). Он заменил традиционный способ растяжения кольца. Суть способа заключается в проведении испытания кольцевого образца последовательно в два этапа при одной и той же температуре. На первом этапе образец сжимается на заданную величину плоским бойком в радиальном направлении. Будем называть этот этап овализацией образца. На втором этапе овализованный образец растягивается на полуцилиндрических опорах.

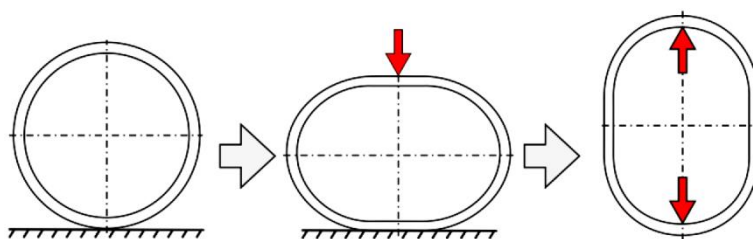


Рис. 4. Комбинированный способ испытания кольцевого образца

Способ сжатия кольцевого образца в радиальном направлении нашел применение при оценке механических характеристик оболочек твэлов из малопластичных материалов. В данном случае, когда образец разрушается при овализации, в качестве механических характеристик рассматривают локальные значения напряжения и деформации. Для этого с помощью компьютерной программы, основанной на методе конечных элементов, вычисляют напряженно-деформированное состояние (НДС) образца в момент разрушения. Аналогичный подход представлен в зарубежных и отечественных работах [22–29].

Подход ИРМ удобно использовать в послереакторных исследованиях коротких участков оболочек твэлов реактора БН-600 с разными уровнями повреждающих доз и температур облучения. На этих участках пластичность при различной температуре испытания может быть как низкой, так и на уровне, позволяющем кольцевому образцу деформироваться без разрушения при радиальном сжатии. Результаты механических испытаний образцов из оболочек твэлов реактора БН-600, обладающих низкой пластичностью, продемонстрированы в работах [28, 29]. Нерассмотренными вопросами остаются применимость комбинированного способа испытания кольцевых образцов для исследования оболочек твэлов с различными повреждающими дозами и сравнение результатов этих испытаний с результатами испытаний колец традиционным способом растяжения. Обоснование использования комбинированного способа нагружения является целью данной работы.

2. Материал и методика

Отработку комбинированного способа механических испытаний кольцевых образцов, состоящего из процедуры овализации и последующего растяжения кольцевых образцов, проводили на образцах, вырезанных из оболочки ТВЭЛ в исходном необлученном состоянии. В качестве модельного материала выбрали оболочку из аустенитной стали типа 16Cr–15Ni х. д. (ЧС68, ТУ 14-131-960-2001, холоднодеформированное состояние после деформации на 20 % методом короткооправочного волочения [30]). Наружный диаметр и толщина стенки оболочки составляли 6,9 мм и 0,4 мм соответственно, а высота образцов – $2,4 \pm 0,1$ мм.

Перед механическими испытаниями с целью определения необходимой величины перемещения плоского бойка при овализации кольцевого образца выполнили конечно-элементное моделирование этого процесса по специализированной компьютерной программе [31]. Данная программа позволяет моделировать в условиях плоской деформации напряженно-деформированное состояние (НДС) кольцевого образца при его растяжении традиционным способом, радиальное сжатие кольцевого образца плоским бойком и последующее растяжение овализованного образца на полуцилиндрических опорах захватов. Допущение о плоском деформированном состоянии кольцевого образца в рассматриваемом виде испытания основывается на соотношении размеров поперечного сечения кольца, при котором его высота в шесть раз больше толщины, а также на наличии трения между деформирующим инструментом и кольцом.

Входными данными для проведения моделирования являлись: геометрия образца (наружный диаметр, толщина стенки и ширина кольца), характеристики упругости (модуль Юнга $E = 200$ ГПа и коэффициент Пуассона $\mu = 0,35$), коэффициент трения образца с деформирующим инструментом, равный 0,1, а также диаграмма деформационного упрочнения материала образца, аппроксимированная функцией (1), для построения которой использовали метод продольного сжатия кольцевого образца высотой 5 мм [14], вырезанного из этого же модельного материала.

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

где σ_s – сопротивление деформации, МПа; Λ – степень пластической деформации сдвига; $\sigma_T = 630$ МПа – предел текучести; $a_1 = 1,65 \cdot 10^3$ и $a_2 = 0,05$ – коэффициенты аппроксимации.

Для построения конечно-элементной модели кольцевого образца использовали регулярную сетку с размером ячеек 60×40 мкм. В результате моделирования определяли габариты кольца в момент завершения им полного охвата опор захватов (рис. 5 а) при традиционном виде испытаний на растяжение и габариты кольца после его овализации посредством радиального сжатия плоским бойком. Во втором случае оценивали зазоры между опорами захватов и овализованным образцом при его размещении на опорах для дальнейшего растяжения. Кроме того определяли локальные значения степени пластической деформации сдвига Λ на рабочей части образца в момент его посадки на опоры захватов.

Эксперименты на радиальное сжатие образцов проводили при комнатной температуре 25 °С и повышенной температуре 500 °С, которая рассматривалась как средняя температура облучения материала оболочки в активной зоне реактора БН-600. Скорость перемещения бойка составляла 1 мм/мин. Для сравнения овализацию образцов осуществляли на трех разных универсальных испытательных машинах (по одному образцу на испытательном оборудовании), а растяжение – на одной и той же разрывной машине.

Растяжение образцов выполняли по традиционной методике испытания и комбинированным способом со скоростью перемещения активного захвата 1 мм/мин на разрывной машине 1246Р-2/2300 на захватах с полуцилиндрическими опорами $\varnothing 4,8$ мм. В табл. 1 приведены технические характеристики испытательного оборудования.

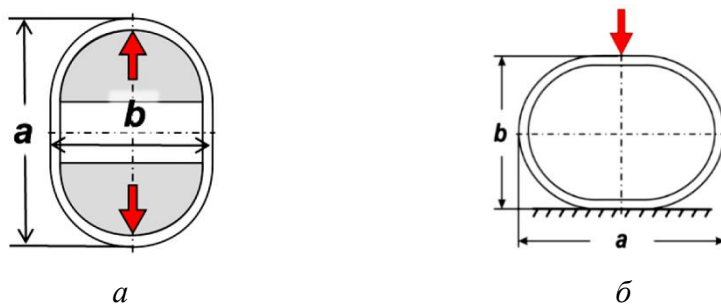


Рис. 5. Схема определения габаритов кольцевого образца: традиционный вид испытания растяжением образца на опоре (а); этап овализации образца (б)

Таблица 1

Технические характеристики испытательного оборудования

Параметры машины	Тип испытания			
	Растяжение	Овализация		
Испытательная машина	1246P-2/2300	Instron 5982	СМТ-5	СМИ-20-700/0,1
Тип привода	Электромеханический			Гидравлический
Относительная погрешность измерения нагрузки, %	1	0,5	0,5	1
Абсолютная погрешность измерения перемещения активного захвата, мкм	±5	±2	±4	±8

Испытания образцов комбинированным способом осуществляли в нескольких вариантах: вариант № 1 – овализация и растяжение при 25 °С; вариант № 2 – овализация при 25 °С и последующее растяжение при 500 °С; вариант №3 – овализация и растяжение при 500 °С. При тех же температурах растяжение кольцевых образцов проводили по традиционному способу испытания. В каждом варианте испытывали по 3 образца. После растяжения образцов по методике ГОСТ 1497 графическим способом обрабатывали экспериментальные диаграммы и вычисляли $\sigma_{0,2}$, σ_b и δ . Дополнительно в месте разрушения определяли характеристики пластичности: относительное сужение Ψ и степень пластической деформации сдвига Λ .

Апробацию комбинированного способа испытаний кольцевых образцов проводили на образцах, изготовленных из оболочки твэла после эксплуатации в реакторе БН-600. Материалом оболочки служила сталь типа 16Cr-19Ni х. д. (ЭК164, ТУ 14-3-1511-87, холоднодеформированное состояние после деформации на 20 % методом короткооправочного волочения [32]). Образцы были вырезаны из следующих участков оболочки: низкотемпературный (доза ~ 60 сна при температуре облучения 410 ± 20 °С), высокотемпературный (доза ~ 60 сна при температуре облучения 560 ± 20 °С) и центр твэла, где повреждающая доза на оболочке составила ~ 95 сна при температуре облучения 510 ± 20 °С. По аналогии с необлученными образцами вначале на установке СМТ-20-700/0,1 с использованием защитного контейнера проводили овализацию кольцевых образцов. После этого овализованные образцы растягивали на разрывной машине 1246P-2/2300. Для сравнения растяжение части облученных кольцевых образцов проводили по традиционной методике. Рабочие температуры облучения в активной зоне реактора БН-600 находятся в диапазоне 400–600 °С. При данных температурах деформационное поведение материала оболочки на участках «низ», «центр» и «верх» твэла существенно отличается. В виду ограниченного количества материала испытания облученных образцов проводили только при температурах 400 °С и 600 °С по 2 образца на точку для каждой схемы растяжения.

3. Результаты и обсуждение

3.1. Растяжение кольцевого образца на полуцилиндрических опорах

Выполнено конечно-элементное моделирование процесса растяжения кольцевого образца на полуцилиндрических опорах в условиях плоского деформированного состояния по специализированной компьютерной программе [31]. На рис. 6 представлены экспериментальные и расчетная диаграммы растяжения кольцевого образца на полуцилиндрических опорах в традиционном виде испытаний на растяжение. Близость экспериментальных и расчетных значений данных кривых обеспечена адекватным описанием кривой упрочнения (1), заданием значений упругих констант и коэффициента трения для материала образца и условий его нагружения. На представленных диаграммах можно выделить четыре участка: первый – от начала координат до точки 1, второй – между точками 1 и 3, третий – между точками 3 и 5.

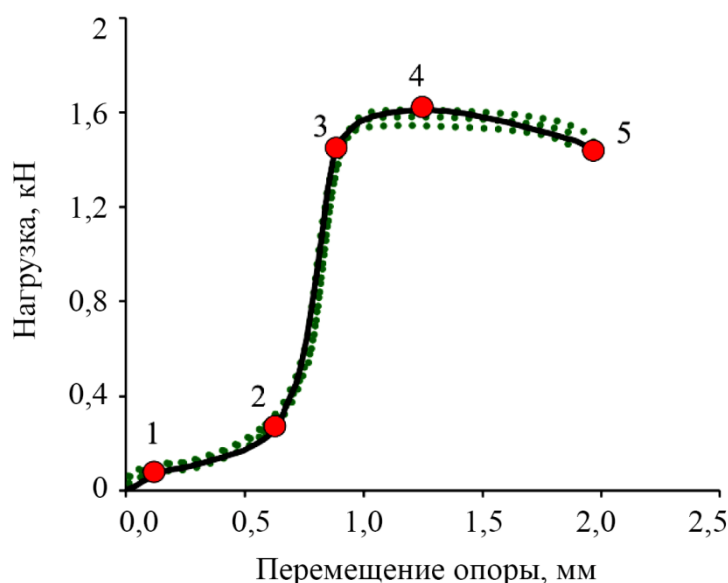


Рис. 6. Экспериментальные (точки) и расчетная (сплошная линия) диаграммы нагружения при традиционном виде испытаний на растяжение на полуцилиндрических опорах кольцевого образца из стали типа 16Cr–15Ni х. д. при температуре испытания 25 °С

Анализ распределения в теле кольцевого образца интенсивности пластической деформации сдвига Λ , полученной в результате конечно-элементного моделирования рассматриваемого процесса, показал следующее. До точки 1 происходит упругий изгиб кольца. В точке 1 начинается пластическая деформация в рабочей зоне кольца (рис. 7 а). В незакрашенной области образца деформация чисто упругая. В точке 2 происходит охват кольцом половины поверхности цилиндрической опоры (рис. 7 б). В теле кольца имеют место как упругие, так и пластические деформации. В точке 3 завершается охват кольцом поверхности цилиндрической опоры (рис. 7 в), что приводит к овализации образца при традиционном виде испытания растяжением. С этого момента нагружения весь объем кольца подвержен пластической деформации. При этом на рабочих частях пластическая деформация распределяется ассиметрично по толщине стенки кольца. Основная ее часть накапливается с внутренней стороны стенки образца (рис. 7 в). При максимальной нагрузке (точка 4 на рис. 6) происходит перераспределение пластической деформации по длине рабочей части образца, начинается локализация деформации и образование шейки (рис. 7 г). При дальнейшем растяжении образца пластическая деформация в шейке накапливается до максимальных значений (рис. 7 д), происходит разрушение образца (точка 5 на рис. 6).

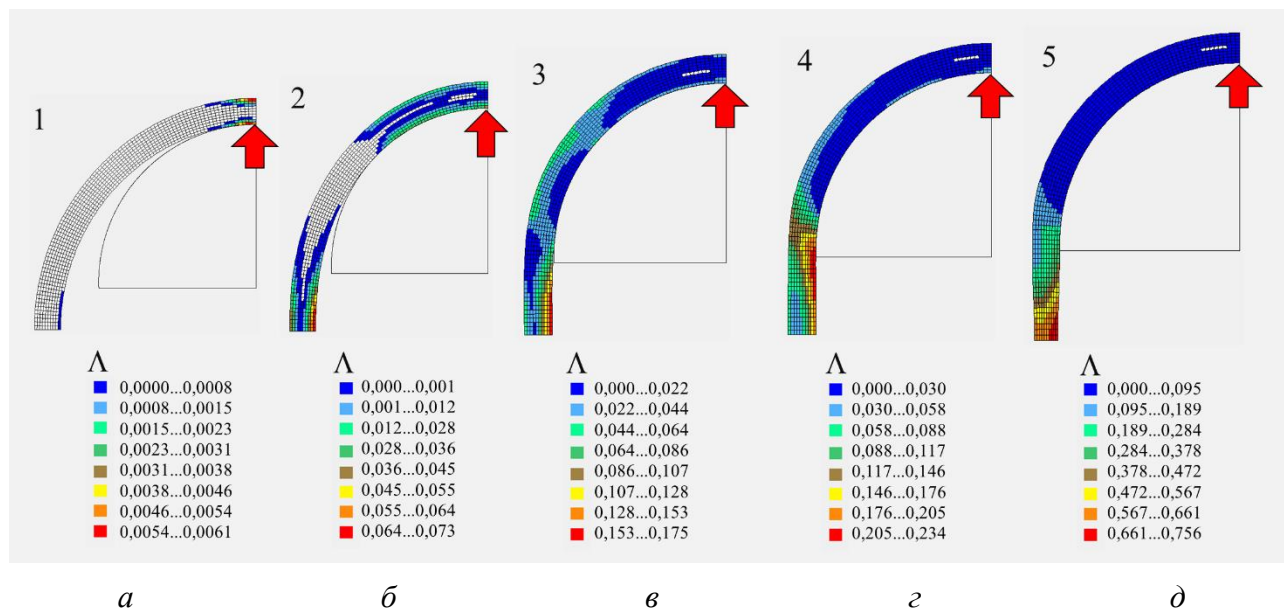


Рис. 7. Результаты конечно-элементного моделирования процесса нагружения при традиционном виде испытаний на растяжение кольцевого образца из стали типа 16Cr–15Ni х. д. на полуцилиндрических опорах: в точке 1 (а); в точке 2 (б); в точке 3 (в); в точке 4 (г); в точке 5 (д)

3.2. Овализация кольцевого образца

Процедуру овализации кольцевого образца посредством его сжатия плоским бойком в радиальном направлении моделировали для разных значений перемещения бойка. Было установлено, что перемещение бойка Δ должно составлять 1,2 мм. Это позволяет разместить овализованный образец на полуцилиндрических опорах и обеспечить наименьшую величину зазора между внутренней поверхностью рабочей части овализованного образца и опорой захватов, равную 0,05 мм. При этом в верхней части между образцом и опорой максимальный зазор составляет 0,2 мм (рис. 8). В табл. 2 представлены расчетные значения габаритов овализованного образца.

Важным требованием к проведению овализации кольцевого образца является соблюдение соосности нагружения на протяжении всего периода испытания. Это необходимо для того, чтобы нагрузка действовала точно по центру оси кольца, а образец во время испытания не смещался в сторону от этой оси. Для выполнения данного требования была разработана и изготовлена специальная технологическая оснастка в виде составного контейнера из нержавеющей стали. Конструктивные элементы этой оснастки: корпус, основание, боек, выполненный конструктивно в виде пуансона, ограничительная шайба и центратор образца. Образец устанавливали в ограничивающую шайбу с центрирующим элементом внутри контейнера. Это позволяет сохранять положение кольца по центру оси нагружения бойком. Проведенная на разном оборудовании процедура овализации необлученных образцов с использованием разработанного контейнера показала удовлетворительную сходимость результатов нагружения. Это видно по экспериментальным диаграммам радиального сжатия, которые хорошо накладываются друг на друга и сочетаются с расчетной диаграммой. Относительная разница между нагрузкой в экспериментальных и расчетной диаграммах не превышала 10 % (рис. 9 а). По сравнению с овализацией кольца, которая происходит в точке 3 на рис. 6 при традиционном виде испытания растяжением на опорах, в данной схеме овализации на рабочей части кольцевого образца, в месте давящего бойка, распределение пластической деформации по толщине стенки практически симметричное (рис. 9 б).

Таблица 2

Расчетные габариты овализованных образцов в различных видах нагружения

Этап овализации кольцевого образца	Перемещение деформирующего инструмента, мм	Расчетные габариты овализованного образца, мм	
		<i>a</i>	<i>b</i>
Традиционный способ растяжения образца на полуцилиндрических опорах	0,85	7,84	5,70
Радиальное сжатие бойком	1,0	7,51	6,14
	1,2	7,84	5,69
	1,5	7,90	5,62

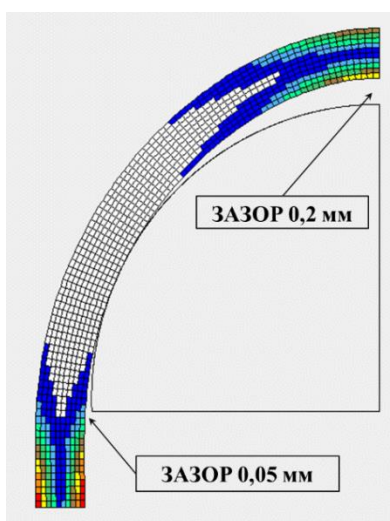


Рис. 8. Взаимное расположение полуцилиндрической опоры и кольцевого образца перед его растяжением после этапа овализации для $\Delta = 1,2$ мм

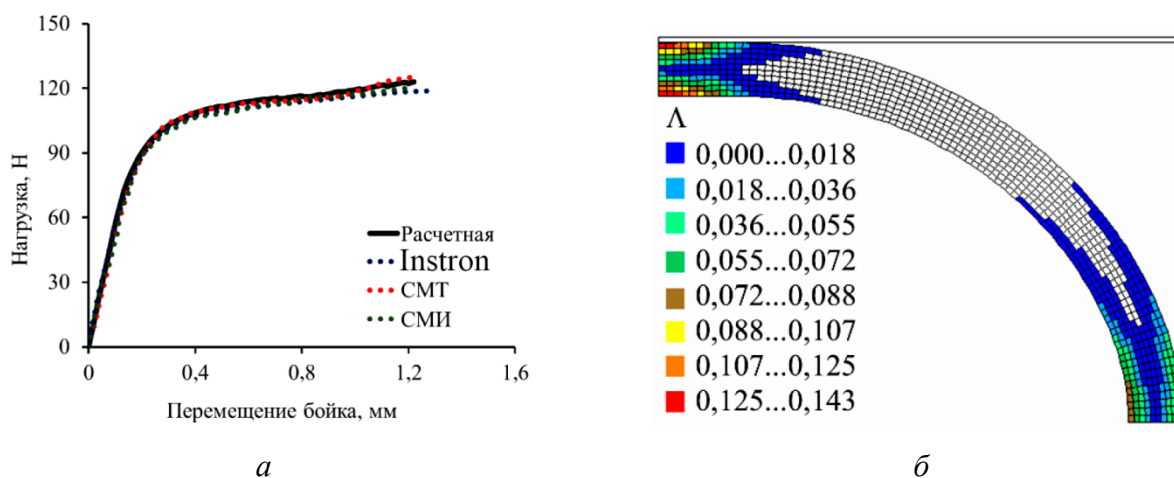


Рис. 9. Диаграммы нагружения кольцевого образца из стали типа 16Cr–15Ni х. д. (а) и полученное распределение интенсивности пластической деформации сдвига Λ в образце (б) на этапе овализации при сжатии

Дополнительно для проверки корректности вычислений формоизменения конечно-элементной модели кольцевого образца с помощью микрометра были измерены габариты овализованных образцов. Средние значения большой и малой полуосей составили $a \approx 7,92$ мм и $b \approx 5,71$ мм, а относительная разница между расчетными и измеренными значениями не превысила 1 %. Таким образом, использование ограничительной шайбы позволило проводить овализацию кольцевых образцов до строго установленной величины перемещения бойка, при которой образец приобретал необходимые габариты для размещения его на полукруглых опорах $\varnothing 4,8$ мм для последующего растяжения.

3.3. Результаты механических испытаний на растяжение традиционным и комбинированным способами необлученных кольцевых образцов из стали типа 16Cr–15Ni х. д.

На рис. 10 представлены типичные диаграммы растяжения кольцевых образцов традиционным способом и растяжения кольцевых образцов после их овализации в комбинированном способе. Характерной особенностью растяжения колец традиционным способом является изгиб рабочих частей в начале испытания, в ходе которого пластическая деформация накапливается неравномерно по периметру кольца. При этом диаграмма испытания (рис. 10) на данном участке до точки А (окончание овализации кольца при растяжении) не отражает реальных процессов деформирования материала, что затрудняет определение механических свойств $\sigma_{0,2}$, σ_B и δ , как отмечалось ранее. В традиционной схеме растяжения, во время длительного изгиба, пластическая деформация накапливается с внутренней стороны стенки образца, что приводит к реализации условий разрушения путем расклинивающего отрыва при полном исчерпании запаса пластичности материала.

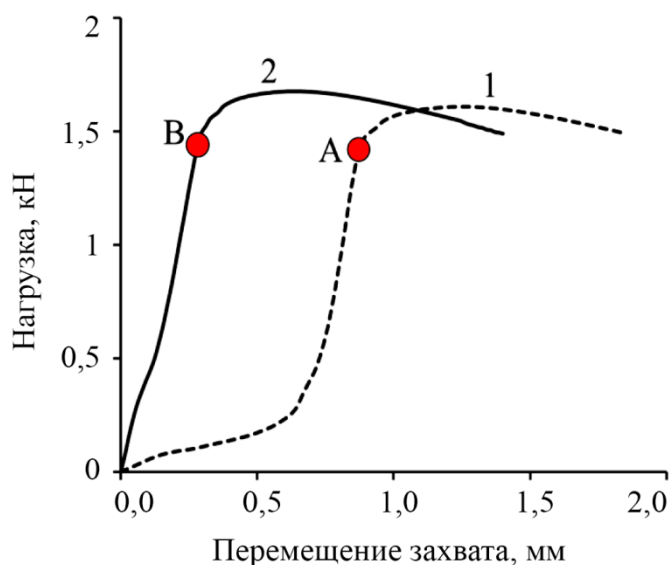


Рис. 10. Типичные диаграммы растяжения кольцевых образцов традиционным способом (1) и растяжения кольцевых образцов после их овализации в комбинированном способе (2): в точке А реализуется схема овализации кольца при растяжении на опорах; в точке В завершается устранение зазоров между овализованным образцом и опорами

Основной целью процедуры овализации кольца при сжатии в радиальном направлении являлось создание рабочих частей образца с симметричным распределением пластической деформации по толщине стенки. При моделировании НДС кольцевого образца при традиционном растяжении в точке А с внутренней стороны значение степени пластической деформации сдвига составляет $\Lambda \approx 0,175$, а с внешней – $\Lambda \approx 0,064$ (рис. 11 а). Это говорит

об отсутствии симметричности распределения пластической деформации по толщине стенки образца. Как показано выше, овализация путем сжатия позволяет добиться лучшей симметричности распределения пластической деформации по толщине рабочей части: с внутренней стороны $\Lambda \approx 0,143$ и с внешней – $\Lambda \approx 0,125$ (рис. 9 б). Моделирование НДС овализованного образца при растяжении в точке В (рис. 10), где заканчивается стадия устранения зазоров между образцом и опорами, показывает сохранение симметричности распределения пластической деформации. Причем значения Λ с внутренней и внешней сторон (соответственно, $\Lambda \approx 0,16$ и $\Lambda \approx 0,14$ (рис. 11 б)), меньше, чем в точке А при традиционном растяжении кольца.

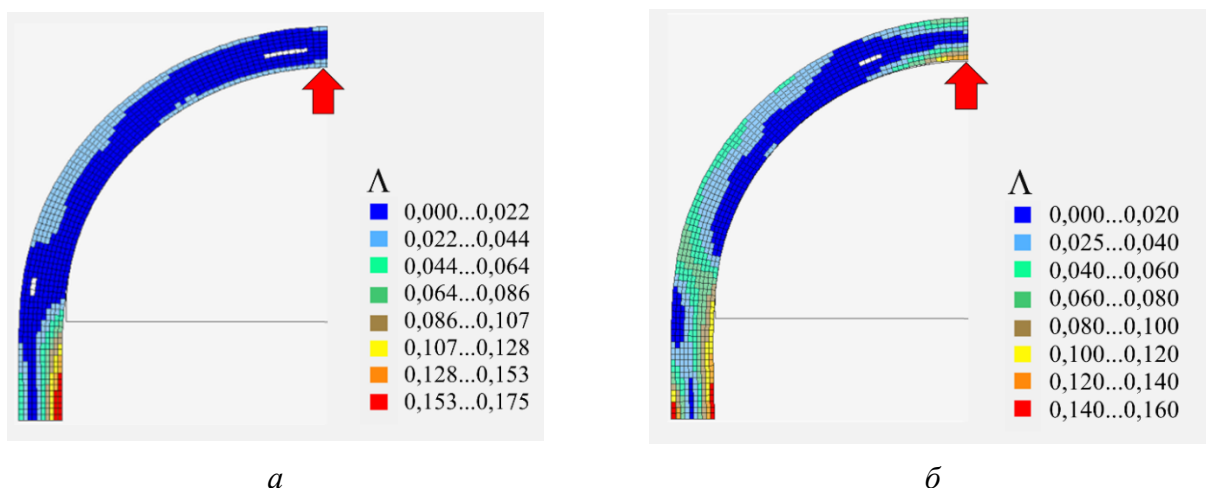


Рис. 11. Распределение степени пластической деформации сдвига Λ : в точке А при традиционной схеме растяжения (а); в точке В предварительно овализованного образца (б)

Процедура определения прочностных и пластических свойств металлов и сплавов при растяжении стандартных образцов цилиндрической и плоской формы регламентируется ГОСТ 1497. Данный стандарт по определению не применим к обработке результатов растяжения данных колец, так как его методика исходит из наличия области упругого деформирования образца на начальном этапе нагружения в виде наклонного прямолинейного участка прямой на диаграмме нагружения. Как показано ранее, при растяжении колец традиционным способом на наклонном прямолинейном участке диаграммы нагружения происходит изгиб кольца при наличии как упругих, так и пластических деформаций в рабочих частях кольца. Поэтому обработка диаграмм по ГОСТ 1497 на условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, предел прочности σ_b и относительное удлинение после разрыва δ не учитывает процессы, связанные с деформационным упрочнением на этом этапе.

При овализации кольцевого образца плоским бойком тоже происходит деформационное упрочнение. Однако величина накопленной пластической деформации меньше, и она более симметрично распределена по толщине образца, чем при традиционном способе растяжения кольцевого образца. Диаграмма растяжения овализованного образца на начальном этапе нагружения до точки В (рис. 10) имеет два участка: криволинейный, на котором происходит выработка зазоров между опорой и внутренней поверхностью образца (рис. 8), и прямолинейный участок упругого деформирования рабочей части образца. Это является основанием для применения методики ГОСТ 1497 при обработке диаграммы растяжения овализованного образца для определения кратковременных механических свойств $\sigma_{0,2}$, σ_b и δ .

После растяжения овализованных образцов по методике ГОСТ 1497 графическим способом (рис. 12) обрабатывали экспериментальные диаграммы. Условный предел текучести $\sigma_{0,2}$, предел прочности σ_b и относительное удлинение после разрыва δ вычисляли по формулам (2)–(4). Полученные значения механических характеристик усредняли и рассчи-

тывали доверительные границы интервалов средних значений механических величин при доверительной вероятности $P = 0,9$ (уровень значимости $\alpha = 0,1$; коэффициент Стьюдента $t_\alpha = 2,9$; количество образцов $n = 3$).

$$\sigma_{0,2} = \frac{F_{0,2}}{2S_0}, \quad (2)$$

$$\sigma_B = \frac{F_{\max}}{2S_0}, \quad (3)$$

$$\delta = \frac{\Delta l}{l_0} \cdot 100\%, \quad (4)$$

где $F_{0,2}$ и $F_{\max}$ – соответствующие нагрузки, представленные на рис. 12, кН; S_0 – начальная площадь поперечного сечения образца, мм²; Δl – удлинение по диаграмме растяжения на рис. 12, мм; l_0 – расчетная начальная длина рабочей части кольцевого образца, мм, рассчитываемая по формуле

$$l_0 = \frac{\pi}{2} [(D_H - t_0) - 0,5(d_3 + t_0)], \quad (5)$$

где D_H – наружный диаметр кольцевого образца, мм; $d_3 = 4,8$ мм – диаметр захватов; t_0 – начальная толщина стенки образца, мм.

Помимо кратковременных механических свойств $\sigma_{0,2}$, σ_B и δ , вычисляемых по формулам (2)–(4), путем измерения толщины и ширины рабочей части образца в области сужения (рис. 13) определяли показатели пластичности материала оболочки твэла: относительное сужение после разрыва Ψ и степень пластической деформации сдвига Λ [33].

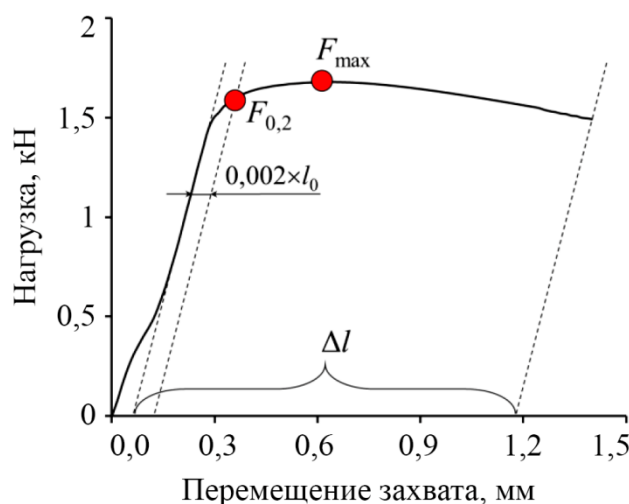


Рис. 12. Данные диаграммы растяжения для ее графической обработки

Данные величины рассчитывали по формулам

$$\Psi = \frac{H_0 \cdot t_0 - H \cdot t}{H_0 \cdot t_0} \cdot 100\%, \quad (6)$$

$$\Lambda = 2 \sqrt{\left(\ln \frac{t}{t_0} \right)^2 + \left(\ln \frac{t}{t_0} \right) \cdot \left(\ln \frac{H}{H_0} \right) + \left(\ln \frac{H}{H_0} \right)^2}, \quad (7)$$

где t_0 , t и H_0 , H – толщина и ширина рабочей части образца до и после испытания соответственно, мм.



Рис. 13. Типичный вид разрыва в области шейки кольцевого образца после испытания на растяжение на полуцилиндрических опорах

В табл. 3 приведены средние значения кратковременных механических свойств и показателей пластичности материала из аустенитной стали типа 16Cr–15Ni х. д. в необлученном (исходном) состоянии. В этой таблице $T_{\text{ов}}$ и $T_{\text{раст}}$ – температуры при овализации и растяжении образца соответственно. Из табл. 3 следует, что предварительная овализация колец незначительно влияет на определение прочностных характеристик $\sigma_{0,2}$ и σ_b , разница находится в пределах статистической ошибки. Обработка результатов испытаний и измерений в местах сужения рабочих частей образца показала, что характеристики пластичности δ , Ψ и Λ у овализованных образцов выше, чем у кольцевых образцов, растянутых традиционным способом. Относительное удлинение после разрыва δ , полученное при испытании комбинированным способом, на 1,0–1,5 % выше значений для кольцевых образцов, испытанных по традиционной схеме. Показатели пластичности Ψ и Λ при комнатной температуре испытания, полученные при разных способах растяжения, отличаются незначительно. Существенная разница значений Ψ и Λ наблюдается при температуре испытания 500 °С и может составлять в относительном эквиваленте ~25 % и ~10 %, в зависимости от температуры овализации образца (25 и 500 °С соответственно). Отметим, что снижение приведенных показателей пластичности стали типа 16Cr–15Ni х. д., связанное с повышением температуры испытания, обусловлено совокупностью влияния технологических факторов при изготовлении оболочек (легирование, структура материала после холодной деформации и др.), приводящих к характерному деформационному поведению реакторных сталей [34].

Таким образом, процедура предварительной овализации кольцевых образцов распределяет величину пластической деформации по толщине стенки кольца практически симметрично, что приводит к более корректной оценке пластических свойств при последующем растяжении образцов.

Таблица 3

Механические свойства оболочки твэла из аустенитной стали типа 16Cr–15Ni х. д.
в необлученном (исходном) состоянии

Способ растяжения		$T_{\text{ов}},$ °C	$T_{\text{раст}},$ °C	$\sigma_{0,2},$ МПа	$\sigma_{\text{в}},$ МПа	$\delta,$ %	$\Psi,$ %	Λ
Традиционный		—	25	760 ± 10	815 ± 5	$17,0 \pm 0,9$	37 ± 1	$0,81 \pm 0,02$
			500	630 ± 35	660 ± 10	$5,5 \pm 1,7$	23 ± 2	$0,48 \pm 0,03$
Комбиниро- ванный	№ 1	25	25	780 ± 10	825 ± 5	$18,5 \pm 0,9$	38 ± 1	$0,83 \pm 0,02$
	№ 2	25	500	640 ± 30	675 ± 10	$6,5 \pm 0,9$	31 ± 1	$0,63 \pm 0,05$
	№ 3	500	500	625 ± 30	665 ± 10	$6,3 \pm 1,0$	26 ± 2	$0,54 \pm 0,03$

3.4. Результаты механических испытаний на растяжение традиционным и комбинированным способами облученных кольцевых образцов из стали типа 16Cr–19Ni х. д.

На рис. 14–16 приведены типичные диаграммы растяжения традиционным и комбинированным способами кольцевых образцов из стали 16Cr–19Ni х. д., облученных до повреждающих доз 60 и 95 сна при разных температурах облучения. Результаты испытаний при растяжении облученных образцов демонстрируют деформационное поведение, аналогичное поведению необлученных образцов. При традиционном способе растяжения облученных образцов начальная стадия испытания, обусловленная изгибом его рабочих частей, имеет место при перемещении захвата ≥ 1 мм, тогда как у необлученных образцов эта стадия заканчивается при перемещении захвата $\sim 0,6$ мм. Это связано с увеличением диаметра облученной оболочки твэла из-за эффектов распухания и ползучести материала, произошедших в ходе облучения. Например, у кольцевых образцов, облученных до повреждающей дозы 95 сна, наружный диаметр составлял 7,05 мм, а у необлученных образцов этот диаметр равен 6,90 мм. Как обсуждалось ранее, длительная стадия изгиба кольцевого образца может привести к искажению или потере ценной информации о механических свойствах образца из-за истощения запаса пластичности материала, который подвергался нейтронному облучению.

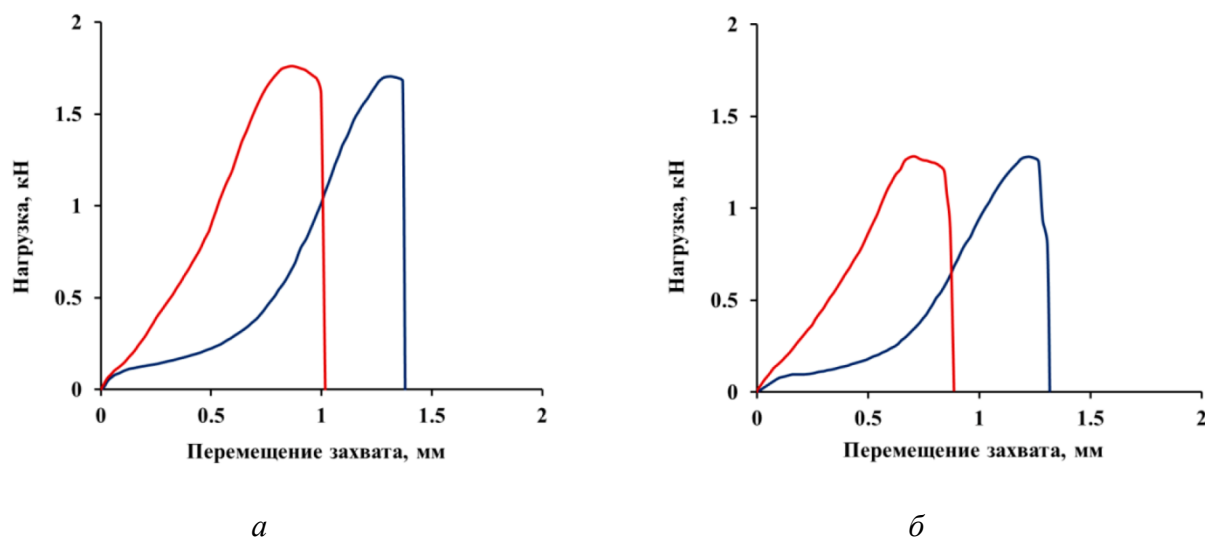


Рис. 14. Типичные диаграммы растяжения традиционным (синяя линия) и комбинированным (красная линия) способами кольцевых образцов из стали 16Cr–19Ni х. д., облученных до 60 сна при температуре облучения $T_{\text{обл}} = 410$ °C: температура испытания 400 °C (а); температура испытания 600 °C (б)

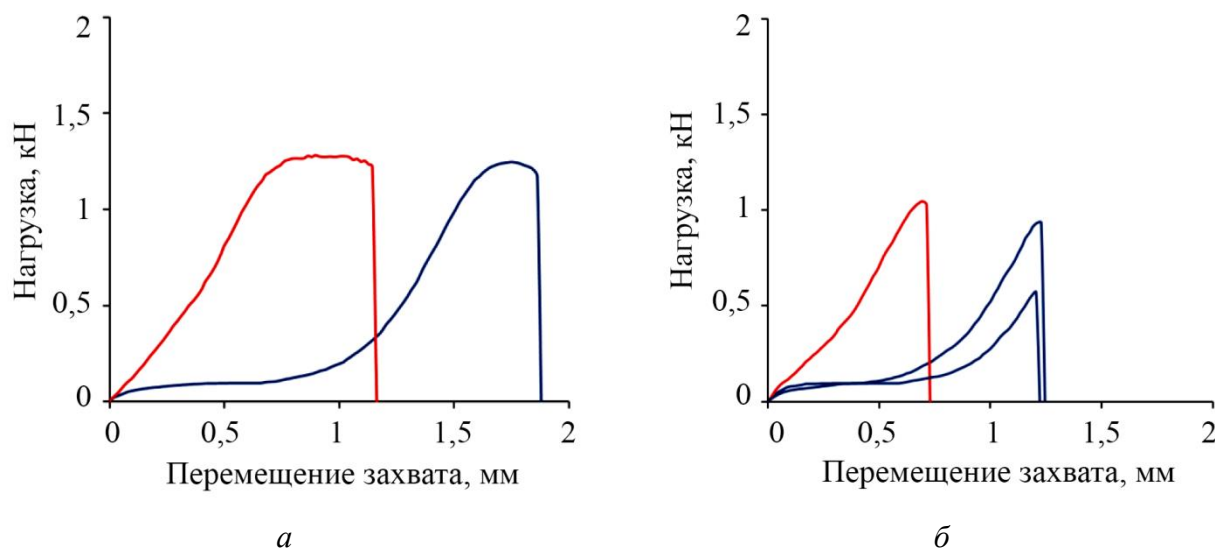


Рис. 15. Типичные диаграммы растяжения традиционным (синяя линия) и комбинированным (красная линия) способами кольцевых образцов из стали 16Cr-19Ni х. д., облученных до 60 сн при температуре облучения $T_{\text{обл}} = 560$ °С: температура испытания 400 °С (а); температура испытания 600 °С (б)

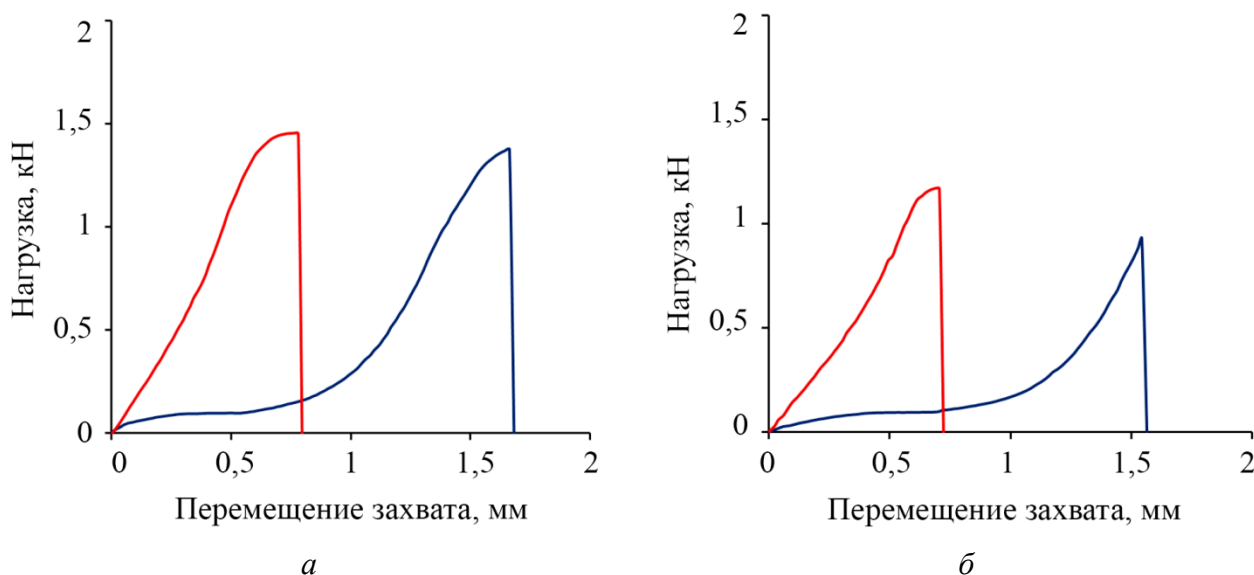


Рис. 16. Типичные диаграммы растяжения традиционным (синяя линия) и комбинированным (красная линия) способами кольцевых образцов из стали 16Cr-19Ni х. д., облученных до 95 сн при температуре облучения $T_{\text{обл}} = 510$ °С: температура испытания 400 °С (а); температура испытания 600 °С (б)

В табл. 4 приведены кратковременные механические свойства облученных образцов из аустенитной стали типа 16Cr-19Ni х. д. В этой таблице: $T_{\text{обл}}$ – температура облучения; $T_{\text{ов}}$ и $T_{\text{раст}}$ – температуры при оваллизации и растяжении образца соответственно; символ «—» означает отсутствие процедуры оваллизации для данных образцов. Для представленных значений механических свойств в качестве ошибки приведены границы абсолютной неисключительной систематической погрешности. Из табл. 4 видно, что значения δ , определенные по диаграммам растяжения образцов традиционным способом, ниже значений δ , полученных по диаграммам растяжения образцов комбинированным способом. Это связано с недостаточной

корректностью определения значений δ по диаграмме растяжения традиционным способом. Причина заключается в том, что до завершения охвата опоры внутренней поверхностью кольца (точка А на рис. 10) на рабочих частях образца выбирается значительная часть пластической деформации, которая никак не учитывается при обработке диаграммы по ГОСТ 1497. Оставшаяся часть пластической деформации, которая регистрируется на диаграмме по перемещению захвата (Δl на рис. 12), очень мала и не позволяет корректно определить значения δ .

При температуре испытания 400 °С сталь типа 16Cr-19Ni х. д. обладает достаточным запасом пластичности, что позволило по диаграммам растяжения как традиционным, так и комбинированным способом определить прочностные характеристики $\sigma_{0,2}$ и σ_b . При температуре испытания 600 °С наблюдались очень низкие значения относительного удлинения $\delta \leq 0,4$ %. Наиболее критичной ситуация оказалась при испытании традиционным способом растяжения двух образцов, облученных до повреждающих доз 60 и 95 сна, что привело к получению некорректной информации о механических свойствах (соответствующие значения помечены символом «*» в табл. 4).

Таблица 4

Механические свойства оболочки твэла из аустенитной стали типа 16Cr-19Ni х. д.
после облучения до повреждающих доз 60 и 95 сна

Способ испытания	Доза, сна	$T_{обл}, ^\circ\text{C}$	$T_{ов}, ^\circ\text{C}$	$T_{раст}, ^\circ\text{C}$	$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$	$\sigma_b, \text{МПа}$	$\delta, \%$
Традиционный	60	410	–	400	820 ± 18	880 ± 20	2,40 ± 0,06
					885 ± 20	905 ± 20	1,00 ± 0,02
				600	670 ± 15	695 ± 16	2,10 ± 0,05
					650 ± 15	700 ± 16	2,00 ± 0,05
	60	560	–	400	64 ± 14	690 ± 16	4,50 ± 0,10
					625 ± 14	670 ± 15	3,90 ± 0,09
				600	510 ± 11	520 ± 12	0,40 ± 0,01
					315*		0*
	95	510	–	400	750 ± 17	840 ± 19	0,90 ± 0,02
					730 ± 17	815 ± 19	1,00 ± 0,02
				600	560 ± 13	565 ± 13	0,40 ± 0,02
					485*		0*
Комбинированный	60	410	400	400	910 ± 20	920 ± 20	3,60 ± 0,08
					890 ± 20	915 ± 20	2,70 ± 0,06
			600	600	685 ± 15	720 ± 16	3,40 ± 0,08
					710 ± 16	735 ± 17	2,90 ± 0,07
	60	560	400	400	650 ± 15	710 ± 16	7,70 ± 0,20
					645 ± 15	705 ± 16	5,10 ± 0,12
			600	600	535 ± 12	545 ± 12	0,90 ± 0,02
					520 ± 12	535 ± 12	0,40 ± 0,01
	95	510	400	400	730 ± 17	815 ± 18	1,70 ± 0,04
					755 ± 17	850 ± 18	1,40 ± 0,03
			600	600	585 ± 13	600 ± 14	1,40 ± 0,03
					575 ± 13	590 ± 13	0,70 ± 0,02

В каждой серии испытаний наблюдаются разбросы прочностных характеристик $\sigma_{0,2}$ и σ_b . При традиционном способе растяжения образцов эти разбросы оказались существенными и выходили за рамки систематической погрешности. Значения прочностных характе-

ристик, определенных по предложенному комбинированному способу испытания, оказались в среднем на 25 МПа выше соответствующих значений, полученных по традиционной схеме растяжения образцов. Разница обуславливается асимметричным распределением пластической деформации в рабочей зоне по толщине стенки кольца и ее сосредоточением со стороны внутренней стенки кольца при растяжении традиционным способом и симметричным распределением пластической деформации в рабочей зоне по толщине стенки кольца у оваллизованного образца при комбинированном способе испытания. Основываясь на полученных данных и анализе распределения пластической деформации в образцах в рассмотренных схемах испытания кольцевых образцов можно заключить, что результаты испытаний образцов комбинированным способом являются более корректными, чем при традиционном способе растяжения кольцевых образцов.

4. Заключение

При испытании растяжением колец на полуцилиндрических опорах традиционным способом происходит изгиб рабочих частей образца на начальной стадии растяжения до завершения охвата опоры внутренней поверхностью кольца, в ходе которого пластическая деформация в образце накапливается неравномерно по периметру и толщине кольца. При этом на линейном участке диаграммы нагружения деформация образца не является чисто упругой и содержит пластическую составляющую, что не позволяет корректно определить механические свойства $\sigma_{0,2}$, σ_b и δ по методике ГОСТ 1497.

Предложенный комбинированный способ механических испытаний кольцевых образцов из оболочки твэла реактора на быстрых нейтронах показал возможность применения методики ГОСТ 1497 для определения кратковременных механических свойств $\sigma_{0,2}$, σ_b и δ материалов оболочек твэлов, как необлученных, так и облученных в реакторе на быстрых нейтронах до повреждающей дозы до 95 сна.

Процедура оваллизации позволяет подготовить рабочие части кольцевого образца перед его последующим испытанием на растяжение. Она обеспечивает близкое к симметричному распределение пластической деформации по толщине стенки образца в его рабочей зоне. При последующем растяжении образца на линейном участке диаграммы нагружения деформация в образце чисто упругая. Это позволяет применять методику ГОСТ 1497 при обработке диаграммы растяжения оваллизованного образца и корректно определять экспериментальные значения кратковременных механических свойств $\sigma_{0,2}$, σ_b и δ .

Финансирование

Работа выполнена в рамках программы «Росатома» по повышению предельного выгорания топлива ТВС реакторов на быстрых нейтронах, государственного задания Минобрнауки России для ИМАШ УрО РАН (№ НИОКТР 124020600042-9), государственного задания Минобрнауки России для ИФМ УрО РАН.

Литература

1. Arsene S., Bai J. A new approach to measuring transverse properties of structural tubing by a ring test // Journal of Testing and Evaluation. – 1996. – Vol. 24 (6) – P. 386–391.
2. Fracture of Zircaloy-4 fuel cladding tubes with hydride blisters / V. Macdonald, D. Le Boulch, A. H. de Menibus, J. Besson, Q. Auzoux, J. Crepin, T. Le Jolu // Procedia Materials Science. – 2014. – Vol. 3. – P. 233–238. – DOI: 10.1016/j.mspro.2014.06.041.
3. Hamanishi E. True stress vs true strain analysis with results of ring tensile tests. // Fuel Safety Research Meeting. – Tokai, Japan, 2006.
4. Bae B.-K., Cho S.-K., Seok C.-S. A study on ring tensile specimens // Materials Science and Engineering: A. – 2008. – Vols. 483–484. – P. 248–250. – DOI: 10.1016/j.msea.2006.10.203.

5. Modified ring stretch tensile testing of Zr-1Nb cladding / M. C. Billone, H. M. Chung, A. B. Cohen, S. Majumdar, L. A. Neimark, W. E. Ruther // Proc. 25th Water Reactor Safety Information Meeting, Bethesda, MD, October 20–22, 1997. – Washington, DC : US Nucl. Regul. Com., 1997. – No. 8127. – URL: <https://www.osti.gov/servlets/purl/8127>
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. 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.
8. Josefsson B., Grigoriev V. Modified ring tensile testing and a new method for fracture toughness testing of irradiated cladding. – Studsvik Material AB, S-61182, Nyköping, Sweden, 1996.
9. Evaluation of axial and tangential ultimate tensile strength of zirconium cladding tubes / M. Király, D. M. Antók, L. Horváth, Z. Hózer // Nuclear Engineering and Technology. – 2018. – Vol. 50 (3). – P. 425–431. – DOI: 10.1016/j.net.2018.01.002.
10. Образец для исследований механических свойств и деформационного поведения материала оболочки твэла реактора типа ВВЭР в тангенциальном направлении / Л. В. Лошманов, П. В. Федотов, А. В. Салатов, О. А. Нечаева, Н. В. Смирнов // Научная сессия МИФИ-2007. Т. 8. Физико-технические проблемы нетрадиционной энергетики. Физико-технические проблемы ядерной энергетики. Мощная импульсная электрофизика. – С. 141–143.
11. 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.
12. 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.
13. Фролов А. С., Федотов И. В. Методология механических испытаний материалов оболочек твэлов российских ядерных реакторов // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Физика ядерных реакторов. – 2024. – № 5. – С. 75–97.
14. 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.
15. Карагерги Р. П., Евсеев М. В., Козлов А. В. Определение коэффициента заторможенности деформации для вычисления начальной расчетной длины рабочей части кольцевого образца из оболочки твэла // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. – 2022. – Т. 88 (4). – С. 33–41. – DOI: 10.26896/1028-6861-2022-88-4-33-41.
16. 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. – P. 1213–1221. – DOI: 10.1016/j.net.2019.11.019.
17. 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. – Т. 47 (1). – P. 74–88. – DOI: 10.18149/MPM.4712021_8.

18. 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.
19. Эволюция микроструктуры стали типа Cr16-Ni19 при облучении в зоне малого обогащения реактора на быстрых нейтронах. формирование и развитие радиационной пористости / И. А. Портных, В. Л. Панченко, А. Е. Устинов, А. В. Козлов // *Физика металлов и металловедение*. – 2025. – Том 126 (1). – С. 98–109. – DOI: 10.7868/s3034621525010104.
20. Panchenko V. L., Portnykh I. A., Ustinov A. E. The evolution of the microstructure of Cr16-Ni19 steel under irradiation in the low enrichment zone of a fast neutron reactor. The effect of neutron irradiation conditions on the structural and phase state // *Physics of Metals and Metal Science*. – 2025. – Vol. 126 (1). – P. 110–122. – DOI: 10.31857/S0015323025010119.
21. Методики кратковременных механических испытаний образцов из оболочки твэла с анализом напряженно-деформированного состояния / Р. П. Карагерги, А. В. Козлов, О. Б. Шилов, С. В. Барсанова, И. А. Портных // *Международная конференция «Физическая мезомеханика. Материалы с многоуровневой иерархически организованной структурой и интеллектуальные производственные технологии»*, Томск, 11–14 сентября 2023 г. : тезисы докладов. – Томск : ИФПМ СО РАН, 2023. – С. 135–136.
22. Determination of the hoop fracture properties of unirradiated hydrogen-charged nuclear fuel cladding from ring compression tests / M. A. Martin-Rengel, F. J. Gomez Sanchez, J. Ruiz-Hervias, L. Caballero // *Journal of Nuclear Materials*. – 2013. – Vol. 436 (1–3). – P. 123–129 – DOI: 10.1016/j.jnucmat.2013.01.311.
23. 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–2018, Prague, Czech Republic, 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
24. 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.
25. 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.
26. Frolov A. S., Fedotov I. V. Comparison of Ring Tension and Compression Test Results for Materials with Low Ductility // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2024. – Iss. 6. – P. 62–90. – DOI: 10.17804/2410-9908.2024.6.062-090. – URL: http://dream-journal.org/issues/2024-6/2024-6_465.html
27. Karagergi R. P., Konovalov A. V., Kozlov A. V. Verification of plastic strain values during ovalization of a ring specimen from a fuel element shell of a fast neutron reactor // *Diagnostics, Resource and Mechanics of materials and structures*. – 2024. – Iss. 5. – P. 117–129. – DOI: 10.17804/2410-9908.2024.5.117-129. – URL: http://dream-journal.org/issues/2024-5/2024-5_484.html
28. 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. – P. 665–672. – DOI: 10.1134/S0031918X2460043X.
29. Assessment of plasticity and damage of material of fuel element shells irradiated with fast neutrons / R. P. Karagergi, I. A. Portnykh, A. V. Konovalov, S. V. Baranova, A. V. Kozlov //

Physics of Metals and Metal Science. – 2025. – Vol. 126 (4). – P. 470–481. – DOI: 10.31857/S00153230250408e6.

30. Спицын Е. В., Целищев А. В., Буданов Ю. П. Исследование влияния режимов аустенизирующего отжига на структурное состояние и характеристики длительной прочности и ползучести твэльных труб из аустенитной стали ЧС68-ИД // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. – 2015. – № 2 (81). – С. 4–14.

31. Свидетельство о регистрации программы для ЭВМ № 2020612158 Рос. Федерация. Программа конечно-элементного моделирования растяжения овального образца на полукруглых опорах / Коновалов А. В., Партин А. С.

32. Митрофанова Н. М., Чурюмова Т. А. Сталь ЭК164 – конструкционный материал оболочек твэлов реакторов БН // Вопросы атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. – 2019. – № 2 (98). – С. 100–109.

33. Богатов А. А., Мижирицкий О. И., Смирнов С. В. Ресурс пластичности металлов при обработке давлением // М. : Металлургия, 1984. – 144 с.

34. Справочник по свойствам материалов для перспективных реакторных технологий : в 6 т. Т. 5. Свойства реакторных сталей и сплавов / В. П. Бобков и др. ; под общ. ред. В. М. Поплавского. – Москва : ИздАТ, 2014. – 582 с.