

REFERENCES

1. Tsvetkov Yu. N. Cavitation wear of metals and machinery parts. — St. Petersburg: Izd. SPbGPU, 2003. — 155 p. [in Russian].
2. Georgievskaya E. P. Cavitation erosion of ship propellers and methods of its control. — Leningrad: Sudostroenie, 1978. — 206 p. [in Russian].
3. Fomin V. V. Hydroerosion of metals. — Moscow: Mashinostroenie, 1977. — 287 p. [in Russian].
4. Vyas B., Preece C. M. Cavitation erosion of face-centered cubic metals / Metallurg. Trans. A. 1977. Vol. 8A. P. 915 – 923.
5. Pogodayev L. I., Kuzmin V. N. Structure-energy models of reliability of materials and machine parts. — St. Petersburg: Akademiya transporta RF, 2006. — 608 p. [in Russian].
6. Hattori S., Ogiso T., Minamib Y., Yamad I. Formation and progression of cavitation erosion surface for long exposure / Wear. 2008. Vol. 265. P. 1619 – 1625.
7. Haosheng C., Jiang L., Darong C., Jiadao W. Damages on steel surface at the incubation stage of the vibration cavitation erosion in water / Wear. 2008. Vol. 265. P. 692 – 698.
8. Tsvetkov Yu. N., Gorbachenko E. O. Research into cavitation wear of steel through measuring roughness / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2015. Vol. 81. N 11. P. 62 – 65 [in Russian].

УДК 620.172

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ КРИВОЙ УПРОЧНЕНИЯ МАТЕРИАЛА ОБОЛОЧЕК ТВЭЛОВ

© А. В. Коновалов¹, Д. И. Вичужанин¹, А. С. Партин¹, А. В. Козлов²*Статья поступила 29 марта 2016 г.*

Предложена методика построения кривой упрочнения материала оболочек твэлов в предположении изотропности его пластического упрочнения для случая больших пластических деформаций. Методика основана на последовательном применении трех видов испытаний по определению сопротивления пластической деформации: 1) растяжения продольных образцов, вырезанных из трубы, в условиях одноосного напряженного состояния; 2) сжатия с большой степенью пластической деформации кольцевого образца с внутренним цилиндрическим стержнем; 3) сжатия сегмента кольцевого образца. Величина степени деформации в стенке кольца во втором виде испытаний определяется по результатам конечно-элементного моделирования этого испытания.

Ключевые слова: кривая упрочнения; оболочка твэла; методика определения.

Оболочки тепловыделяющих элементов (твэл) ядерных реакторов представляют собой тонкостенные трубки малого диаметра и изготавливаются из сплавов алюминия, циркония, нержавеющей стали [1–3]. Характеристики деформационного поведения материала оболочки используются при проектных обоснованиях безопасной работы твэлов. Одной из таких характеристик является кривая упрочнения, выражающая функциональную зависимость меры напряженного состояния — сопротивления пластической деформации σ_s от накопленной пластической деформации ϵ_p . Предполагаем, что материал оболочки твэла изотропный и пластически изотропно упрочняемый. При моделировании напряженно-деформированного состояния оболочки твэла в упругопластической постановке нагружения изотропной и изотропно упрочняемой среды величина сопротивления пластической

деформации σ_s фигурирует в законе пластического нагружения Мизеса [4]:

$$S \cdot S - \frac{2}{3} \sigma_s^2 = 0,$$

где S — девиатор тензора напряжений Коши; двумя точками обозначено двойное скалярное произведение тензоров.

Стандарт [5] регламентирует метод статических испытаний на растяжение металлических труб наружного диаметра от 16 мм и выше при комнатной температуре для определения только стандартных механических характеристик, таких как предел текучести, временное сопротивление, относительное удлинение и сужение.

Поскольку при растяжении образцов одноосное напряженное состояние имеет место при небольших значениях деформации, то данный вид испытаний не позволяет построить кривую упрочнения (сопротивления деформации) для больших величин пластической деформации.

¹ Институт машиноведения УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия; e-mail: avk@imach.uran.ru

² АО «Институт реакторных материалов», г. Заречный, Свердловской области, Россия; e-mail: kozlov_av@irmatom.ru

Цель данной работы — разработка методики определения кривой упрочнения материала оболочек твэлов в предположении изотропности его пластического упрочнения для случая больших пластических деформаций.

Определение сопротивления деформации в опытах на растяжение образцов. Исследовали тонкостенную трубу из стали ЭИ847 с наружным диаметром 6,9 мм и толщиной стенки 0,4 мм. Кривую сопротивления деформации на стадии малых величин степени деформации ε получали из опытов на растяжение продольных образцов, вырезанных из трубы. Поскольку наружный диаметр трубы меньше 16 мм и не охвачен стандартом [5], то продольные образцы изготавливали согласно рекомендациям этого стандарта в виде полос сегмента трубы. Схема образца для испытаний приведена на рис. 1, а, а его фотографии до и после испытаний — на рис. 1, б. Для обеспечения зажима образца без изменения его геометрии в головных частях изготавливали специальные захваты.

Все испытания проводили на оборудовании Центра коллективного пользования ИМАШ УрО РАН.

Растяжение образцов выполнили на испытательной машине Zwick/Roell Z2,5 со скоростью 1 мм/мин. Величину растяжения рабочей части образца измеряли тензометром. Погрешность тензометра и датчика силы по сертификатам калибровки не превышала соответственно 0,31 и 0,38 % от измеряемой величины, что для значений, полученных в испытаниях, составило: для перемещения — 0,05 мм, для силы — 3 Н.

Сопротивление деформации σ_s до момента начала образования шейки, пока имело место одноосное напряженное состояние, определяли по формуле

$$\sigma_s = P/F, \quad (1)$$

где P — текущее значение силы нагружения; F — текущая площадь поперечного сечения образца. Площадь поперечного сечения образца в процессе испытания вычисляли из условия постоянства объема по формуле

$$F = F_0 l_0 / l,$$

где F_0 — начальная площадь поперечного сечения рабочей части образца; l_0 и l — начальная и текущая длина рабочей части образца.

Степень деформации ε до момента образования шейки вычисляли по формуле

$$\varepsilon = \ln(l/l_0). \quad (2)$$

Величину пластической деформации рассчитывали как $\varepsilon_p = \varepsilon - \varepsilon_e$, где $\varepsilon_e = \sigma_s/E$ (E — модуль Юнга) — величина упругой деформации.

Полученные в опытах на растяжение зависимости сопротивления деформации от степени пластической

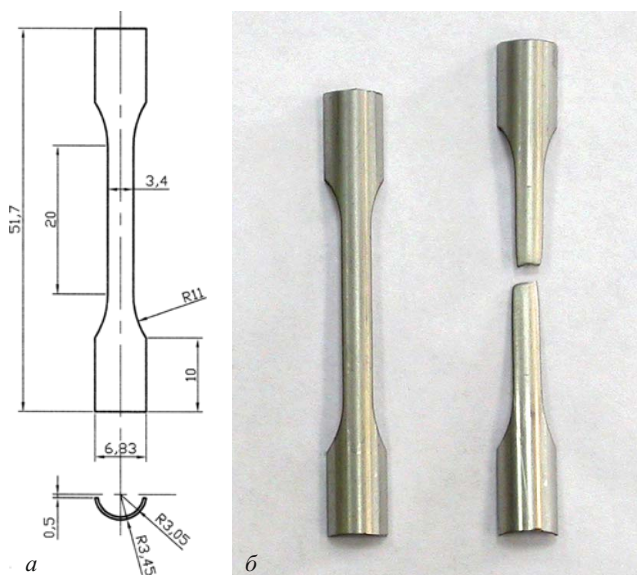


Рис. 1. Схема образца для испытаний на растяжение (а) и его фотографии до и после испытаний (б)

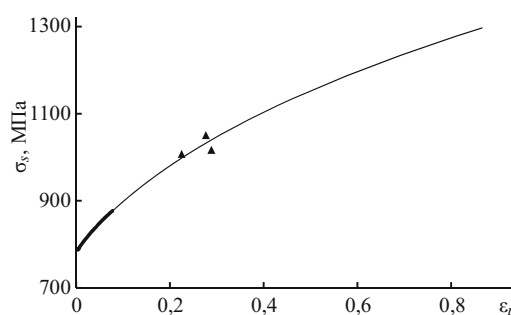


Рис. 2. Зависимость сопротивления деформации σ_s от степени пластической деформации ε_p : жирная линия — растяжение; ▲ — сжатие; тонкая линия — аппроксимация

деформации $\sigma_s(\varepsilon_p)$ представлены на рис. 2 жирной линией.

После образования шейки на рабочей части образца напряженное состояние становится объемным и пользоваться формулами (1) и (2) нельзя. Поэтому для определения зависимости сопротивления деформации от степени деформации при больших степенях деформации использовали другие виды испытаний.

Определение сопротивления деформации в опытах на сжатие образцов. Данные испытания использовали при большей степени деформации, чем та, которая достигается при испытании образца на растяжение. Для этого из трубы вырезали кольцевые образцы высотой 5 мм и в каждый из них устанавливали цилиндрический стержень из стали Ст3 высотой 6 мм и диаметром, примерно равным внутреннему диаметру кольца (рис. 3, а). Далее составные образцы осаживали со скоростью 1 мм/мин на сервогидравлической испытательной установке INSTRON 8801 (рис. 3, б). Высота осаживаемых образцов варьировалась от 3,46 до 4,2 мм. Высота цилиндрического стержня, большая



Рис. 3. Составной образец для испытаний на сжатие: а и б — до и после испытания

чем высота кольца, обеспечивала плотное заполнение материалом стержня внутренней части кольца до момента начала сжатия самого кольцевого образца. Для уменьшения влияния сил трения на контакте инструмента с образцом на торцы образца наносили канавки и применяли графитовую смазку.

Данный вид испытания применили для реализации большой степени деформации в стенке кольца. Величину ее для каждого испытанного образца определяли по результатам конечно-элементного моделирования процесса осадки образца с помощью компьютерной программы, разработанной в ИМАШ УрО РАН. Поскольку толщина кольца намного меньше диаметра составного образца, то полагали, что сопротивление деформации всего составного образца соответствует сопротивлению деформации цилиндрического стержня.

Для компьютерного моделирования экспериментально определяли кривую сопротивления деформации материала стержня составного образца в опытах на сжатие на испытательной установке INSTRON 8801. Погрешность измерения перемещения бойков машины и датчика силы по сертификатам калибровки не превышала соответственно 0,25 и 0,051 % от измеряемой величины, что для значений, полученных в испытаниях, составило: для перемещения — 0,002 мм, для силы — 0,1 кН. Подготовку образцов и обработку экспериментальных данных выполняли согласно стандарту [6]. Для учета влияния сил трения при сжатии образцов при обработке экспериментальных данных использовали дополнительно методику, предложенную в работе [7]. Экспериментальную кривую сопротивления деформации материала стержня описали зависимостью

$$\sigma_s = \sigma_T (1 + a_1 \varepsilon_p)^{a_2}, \quad (3)$$

где $\sigma_T = 182$ МПа; $a_1 = 159$; $a_2 = 0,22$. Значения σ_T и коэффициентов a_1 и a_2 получали, минимизируя среднеквадратическое отклонение опытных и расчетных данных сопротивления деформации.

По результатам компьютерного моделирования сжатия составного образца определяли накопленную

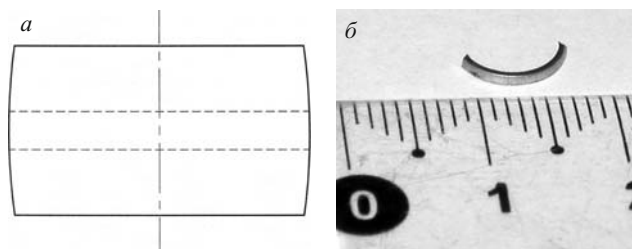


Рис. 4. Схема вырезки сегмента кольца для испытания на сжатие (а) и фотография вырезанного сегмента (б)

степень пластической деформации ε_p на поверхности кольцевого образца посередине его высоты:

$$\varepsilon_p(t) = \int_0^t \sqrt{\frac{2}{3} \dot{\varepsilon}_{ij}^p \dot{\varepsilon}_{ij}^p} d\tau,$$

где $\dot{\varepsilon}_{ij}^p$ — компоненты тензора скоростей пластической деформации в декартовой системе координат.

Затем из кольцевого образца вырезали сегмент (рис. 4). Его осаживали на испытательной установке INSTRON 8801 до момента возникновения небольшой пластической деформации. По результатам этих испытаний определяли значение предела текучести материала кольца при достигнутой в процессе сжатия составного образца степени пластической деформации в центральной части кольца. Предел текучести рассчитывали по формуле (1). Полученные значения предела текучести для трех испытанных образцов представлены на рис. 2 треугольниками.

Результаты исследований сопротивления деформации материала трубчатых образцов из стали ЭИ847. Опытные зависимости сопротивления деформации от степени пластической деформации $\sigma_s(\varepsilon_p)$, полученные при растяжении и сжатии образцов (см. рис. 2), аппроксимировали зависимостью вида (3), где $\sigma_T = 788$ МПа; $a_1 = 6,36$; $a_2 = 0,266$. Рассчитанные по формуле (3) с данными параметрами значения σ_s приведены на рис. 2 тонкой линией. Значения σ_T и коэффициентов a_1 и a_2 подбирали методом достижения максимального соответствия кривой на рис. 2 экспериментальным данным с использованием критерия минимума среднеквадратического отклонения опытных и расчетных данных сопротивления деформации.

Предложенная методика позволяет на основе последовательного применения трех видов испытаний по определению сопротивления пластической деформации (растяжения продольных образцов, вырезанных из трубы, в условиях одноосного напряженного состояния, сжатия с большой степенью пластической деформации кольцевого образца с внутренним цилиндрическим стержнем и сжатия сегмента кольцевого образца) и конечно-элементного моделирования второго вида испытания построить кривую упрочнения материала оболочек твэлов в предположении изотропности его пластического упрочнения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Герасимов В. В., Монахов А. С. Материалы ядерной техники: учебник для вузов. Изд. 2-е, перераб. и доп. — М.: Энергоатомиздат, 1982. — 288 с.
2. Бойко В. И., Кошелев Ф. П. Ядерные технологии в различных сферах человеческой деятельности: учебное пособие. — Томск: Изд-во ТПУ, 2006. — 342 с.
3. Требования к конструкционным материалам. Тепловыделяющие элементы ядерных реакторов. — URL: <http://leg.co.ua/arhiv/generaciya/teplovyydelyayuschie-elementy-yadernyh-reaktorov-26.html>.
4. Седов Л. И. Механика сплошной среды. Т. 2. — М.: Наука, 1984. — 560 с.
5. ГОСТ 10006–80 (ИСО 6892–84). Трубы металлические. Метод испытания на растяжение. — М.: Стандартинформ, 2010. — 12 с.
6. ГОСТ 25.503–97. Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Метод испытания на сжатие. — М.: ИПК Издательство стандартов, 1998. — 25 с.
7. Коновалов Д. А., Коновалов А. В. Идентификация кривой упрочнения металла по результатам испытаний на сжатие образцов / Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2007. Т. 73. № 6. С. 55 – 59.

UDC 620.172

DETERMINATION OF TRUE STRESS-STRAIN (HARDENING) CURVE FOR THE FUEL ROD MATERIAL

© A. V. Konovalov, D. I. Vichuzhanin, A. S. Partin, and A. V. Kozlov

Submitted March 29, 2016.

A technique for determination of the true stress-strain curve for the material of fuel-element cladding is proposed under the assumption of isotropy of plastic hardening in the case of large plastic deformations. The material under the severe plastic deformation is described using the isotropic hardening plasticity. The method is based on the consistent application of three types of tests to determine the plastic resistance: 1) uniaxial tensile test of longitudinal specimens cut from the cladding, 2) compression with a high degree of plastic strain of the annular sample with an internal cylindrical rod, 3) compression of a segment cut from the annular specimen. The degree of strain of the ring wall in the second type of testing is determined from the results of the finite element simulation.

Keywords: true stress-strain (hardening) curve; fuel-element cladding; determination procedure.

REFERENCES

1. Gerasimov V. V., Monakhov A. S. Materials of nuclear technique: a textbook for high schools. 2nd edition. — Moscow: Énergoatomizdat, 1982. — 288 p. [in Russian].
2. Boiko V. I., Koshelev F. P. Nuclear technologies in various spheres fields of human activity. Tutorial. — Tomsk: Izd. TPU, 2006. — 342 p. [in Russian].
3. Construction materials requirements. The fuel elements of nuclear reactors. — URL: <http://leg.co.ua/arhiv/generaciya/teplovyydelyayuschie-elementy-yadernyh-reaktorov-26.html> [in Russian].
4. Sedov L. I. Continuum mechanics. Vol. 2. — Moscow: Nauka, 1984. — 560 p. [in Russian].
5. RF State Standard GOST 10006–80 (ISO 6892–84). Metal tubes. Tensile test method. — Moscow: Standartinform, 2010. — 12 p. [in Russian].
6. RF State Standard GOST 25.503–97. Strength calculation and testing. Methods of mechanical testing of materials. Method of compression testing. — Moscow: IPK Izdatel'stvo standartov, 1998. — 25 p. [in Russian].
7. Konovalov D. A., Konovalov A. V. Identification of the metal hardening curve using data of compression tests / Zavod. Lab. Diagn. Mater. 2007. Vol. 73. N 6. P. 55 – 59 [in Russian].