

УДК 621.774.37:539.319

**Е.В. Кузнецова, О.Н. Горбач, Р.В. Кузнецов,
А.Ю. Мелехин, К.В. Горбач**

Пермский национальный исследовательский
политехнический университет, Пермь, Россия

ВЛИЯНИЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ИЗГОТОВЛЕНИЯ НА УРОВЕНЬ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОБОЛОЧКАХ ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Проведен анализ влияния механических свойств и технологических параметров на величину и распределение остаточных напряжений при производстве тонкостенных оболочек тепловыделяющих элементов из циркониевых сплавов, которые применяются в атомной промышленности. Рассмотрены процесс холодного деформирования прокаткой полых осесимметричных изделий и вопрос формирования остаточных напряжений с учетом анизотропии циркониевых сплавов. При анализе остаточных напряжений применяется методика определения технологических остаточных напряжений на основе энергетического подхода.

Ключевые слова: технологические остаточные напряжения, степень пластической деформации, анизотропия механических свойств, циркониевые сплавы, тепловыделяющие элементы.

**E.V. Kuznetsova, O.N. Gorbach, R.V. Kuznetsov,
A.Iu. Melekhin, K.V. Gorbach**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

INFLUENCE OF TECHNOLOGICAL PARAMETERS OF PRODUCTION ON THE LEVEL OF RESIDUAL STRESSES IN COVERS OF FUEL ELEMENTS

In work the analysis of influence of mechanical properties and technological parameters at a size and distribution of residual stresses is carried out by production of thin-walled covers of the heatallocating elements from zirconium alloys which are applied in the nuclear industry. Thus process of cold deformation by rolling of hollow axisymmetric products and a question of formation of residual stresses taking into account anisotropy of zirconium alloys is considered. In the analysis of residual tension the technique of determination of technological residual stresses on the basis of power approach is applied.

Keywords: technological residual tension, extent of plastic deformation, anisotropy of mechanical properties, the zirconium alloys heatallocating elements.

В атомной промышленности для оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) используются циркониевые сплавы [1]. Точность и прочность таких деталей должна быть безупречной, поэтому необхо-

димо контролировать последеформационное качество. При изготовлении тонкостенных труб для каналов водяных и кипящих реакторов применяются различные методы пластического деформирования, после которого могут возникать технологические остаточные напряжения. Знание того, как формируются остаточные напряжения, позволяет управлять характером распределения и величиной остаточных напряжений в изделиях, обеспечивая их высокие эксплуатационные характеристики.

Технологические процессы производства металлоконструкций путем пластической деформации связаны с формированием в изделиях самоуравновешенной системы остаточных напряжений. Эти напряжения могут достигать значительных величин, сравнимых с пределами текучести и прочности материала, что может привести к изменению размеров или разрушению изделия даже при низких эксплуатационных нагрузках [2–4]. На величину и распределение остаточных напряжений влияют механические и физические свойства материала, а также технологические параметры производства [5, 6]. В связи с этим актуальным является исследование влияния механических свойств материала и технологических параметров на величину остаточных напряжений, так как она непосредственно влияет на качество изготавливаемой ответственной металлопродукции.

На рис. 1 показано влияние холодной деформации на механические свойства при растяжении различных сплавов, где δ – равномерное удлинение образца при растяжении; σ_b – предел текучести; $\sigma_{0,2}$ – условный предел текучести [7]. Зная механические характеристики и параметры технологического процесса, можно найти последеформационные остаточные напряжения, а также выявить влияние технологии изготовления на качество готовой продукции. Для сплавов циркония характерна анизотропия упругих свойств, зависящая от состояния металла. В направлении, перпендикулярном к плоскости базиса, величина нормального модуля упругости наибольшая, выше на 25 % и более, чем в направлении, совпадающим с плоскостью базиса. Холодная деформация несколько увеличивает нормальный модуль упругости, но и его анизотропия становится заметнее.

В монографии [8] рассмотрены методики определения остаточных напряжений в осесимметричных металлоизделиях, в основу которых положен энергетический подход, где потенциальная энергия упру-

гих остаточных напряжений рассматривается как часть энергии пластического деформирования:

$$U = \psi U_d, \quad (1)$$

где ψ – параметр, определяющий долю энергии пластического деформирования, пошедшую на формирование остаточных напряжений; U_d – энергия пластического деформирования.

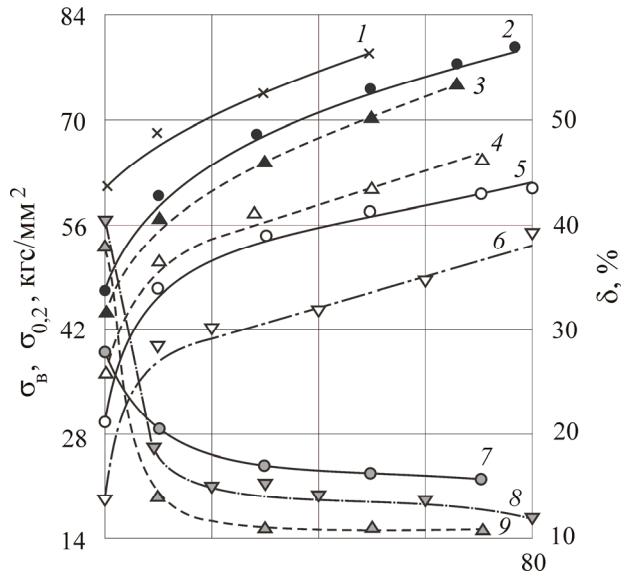


Рис. 1. Влияние холодной деформации на механические свойства при растяжении сплавов циркалой – 2, оженит – 0,5, Zr – 1 % Nb, Zr – 2,5 % Nb [7]:

$1 - \sigma_B$ (Zr – 2,5 % Nb)	$2 - \sigma_B$	$3 - \sigma_B$
$6 - \sigma_{0,2}$	$5 - \sigma_{0,2}$	$4 - \sigma_{0,2}$
$8 - \delta$	$7 - \delta$	$9 - \delta$
(Zr – 1 % Nb)		(оженит – 0,5)
(циркалой – 0,5)		

Потенциальная энергия упругих остаточных напряжений по V (объему трубы) равна

$$U = \frac{1}{2} \int_V \sigma_{ij} \epsilon_{ij} dV, \quad (2)$$

где σ_{ij} – компоненты тензора остаточных напряжений; ϵ_{ij} – компоненты тензора упругих деформаций от действия технологических остаточных напряжений.

Энергия, затраченная на пластическую деформацию заготовки, определяется интегралом

$$U_d = S_{\text{сеч}} \int_0^{\epsilon_{\text{ст}}} \sigma_s d\epsilon, \quad (3)$$

где $S_{\text{сеч}}$ – площадь поперечного сечения заготовки; $\epsilon_{\text{ст}}$ – степень пластической деформации; σ_s – сопротивление деформации материала заготовки.

При холодном пластическом деформировании осесимметричных изделий реализуется схема плоского деформированного состояния, которое описывается уравнениями и соотношениями теории упругости в цилиндрических координатах [9]:

$$\begin{cases} \frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{1}{r} \frac{d\tau_{r\theta}}{d\theta} + \frac{d\tau_{rz}}{dz} + \frac{\sigma_r - \sigma_\theta}{r} = 0, \\ \frac{d\tau_{rz}}{dr} + \frac{1}{r} \frac{d\tau_{\theta z}}{d\theta} + \frac{d\sigma_z}{dz} + \frac{\tau_{rz}}{r} = 0, \\ \frac{d\tau_{r\theta}}{dr} + \frac{1}{r} \frac{d\sigma_\theta}{d\theta} + \frac{d\tau_{\theta z}}{dz} + \frac{2\tau_{r\theta}}{r} = 0. \end{cases} \quad (4)$$

В дальнейшем ограничимся таким видом деформации тел вращения, при котором распределение напряжений не зависит от угла θ , а также примем, что для достаточно длинных труб осевые деформации малы, $\epsilon_z = 0$.

Для реализации энергетического подхода необходимо найти компоненты тензора упругих остаточных напряжений и деформаций от действия остаточных напряжений, входящих в соотношение (2).

Используя полуобратный метод теории упругости, предположим, что радиальное напряжение согласно граничным условиям равенства нулю на внешней ($r = R_1$) и внутренней ($r = R_2$) поверхностях трубы можно записать в виде

$$\sigma_r = -a_0(R_1 - r)(r - R_2), \quad (5)$$

знак минус в выражении (5) означает наличие сжимающих радиальных напряжений [10].

Тогда из первого уравнения равновесия (4) получим выражения для определения окружных остаточных напряжений:

$$\sigma_{\theta} = a_0 \left[(r - R_1)(r - R_2) + r(2r - R_1 - R_2) \right]. \quad (6)$$

Второе из дифференциальных уравнений равновесия (4) дает $\tau_{rz} = C_1/r$.

Для тонкостенных труб и цилиндрических оболочек можно ожидать малых значений τ_{rz} , поэтому полагаем, что $C_1 = 0$ (C_1 – постоянная интегрирования).

Запишем обобщенный закон Гука для осевой деформации:

$$\begin{cases} \varepsilon_r = \frac{1}{E_r} (\sigma_r - \mu_{\theta r} \sigma_{\theta} - \mu_{zr} \sigma_z), \\ \varepsilon_{\theta} = \frac{1}{E_{\theta}} (-\mu_{r\theta} \sigma_r + \sigma_{\theta} - \mu_{z\theta} \sigma_z), \\ \varepsilon_z = \frac{1}{E_z} (-\mu_{rz} \sigma_r - \mu_{\theta z} \sigma_{\theta} + \sigma_z), \end{cases} \quad (7)$$

где E_r , E_{θ} , E_z – модули Юнга для растяжения-сжатия по радиальному, окружному (тангенциальному) и осевому направлениям; $\mu_{r\theta}$ – коэффициент Пуассона, характеризующий сжатие в направлении θ при растяжении в направлении r и т.д.

Полагая, что $\varepsilon_z = 0$ для длинных трубных изделий (принимая гипотезу о плоскодеформированном напряженном состоянии), находим

$$\sigma_z = \frac{a_0}{E_z} \left[(r - R_1)(r - R_2)(\mu_{rz} + \mu_{\theta z}) + \mu_{\theta z} r(2r - R_1 - R_2) \right]. \quad (8)$$

Используя обобщенный закон Гука (7) для относительных деформаций с учетом уравнений (5), (6), (8), можно найти компоненты тензора упругих деформаций:

$$\begin{aligned} \varepsilon_r &= \frac{a_0}{E_r} \left[(r - R_1)(r - R_2) \left(1 - \mu_{\theta r} - \frac{\mu_{zr}(\mu_{rz} + \mu_{\theta z})}{E_z} \right) - r(2r - R_1 - R_2) \left(\mu_{\theta r} + \mu_{zr} \frac{\mu_{\theta z}}{E_z} \right) \right]; \\ \varepsilon_{\theta} &= \frac{a_0}{E_{\theta}} \left[(r - R_1)(r - R_2) \left(1 - \mu_{r\theta} - \frac{\mu_{z\theta}(\mu_{rz} + \mu_{\theta z})}{E_z} \right) + r(2r - R_1 - R_2) \left(1 - \mu_{z\theta} \frac{\mu_{\theta z}}{E_z} \right) \right]. \end{aligned} \quad (9)$$

В выражения (5), (6), (8), (9) входит неизвестный параметр a_0 , характеризующий распределение остаточных напряжений по сечению изделия, который определяется из энергетического условия (1). При известном a_0 находятся компоненты тензора остаточных напряжений для общего случая анизотропии механических свойств из соотношений (5), (6) и (8).

В зависимости от способа производства и обработки циркониевые сплавы имеют ярко выраженную анизотропию в отношении упругих механических свойств, а именно модуль упругости существенно отличается в продольном и поперечном направлениях для трубной заготовки и отмечен в диапазонах от $5,8 \cdot 10^5$ до $10 \cdot 10^5$ МПа [11]. Например, при 20°C модуль Юнга $E = 10^5$ МПа, а после холодной деформации в направлении прокатки появляются различия и модуль упругости составляет $E = 9 \pm 1,7 \cdot 10^5$ МПа, а в поперечном направлении $8,3 \cdot 10^5$ МПа. Далее при повышении температуры до 550°C происходит монотонное уменьшение до $(6 \dots 6,6) \cdot 10^5$ МПа. Содержание сплава также влияет на уровень модуля упругости для сплава: Zr – 1 % Nb и Zr – 2,5 % Nb $E = 9,3 \cdot 10^5$ МПа. Однако в отношении коэффициента Пуассона в различных условиях и направлениях он мало изменяется и определяется как $\mu = 0,33$.

В связи с этим рассмотрим случай, когда при изготовлении циркониевых труб наблюдается заметно выраженная ортотропия упругих свойств в продольном и поперечном направлениях. Пусть $E_r = E_\theta = E$ – модуль упругости в поперечном направлении, а E_z – модуль упругости в продольном направлении, коэффициент Пуассона $\mu_{rz} = \mu_{\theta z} = \mu$, тогда уравнения, определяющие технологические остаточные напряжения, примут следующий вид:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= -a_0(R_1 - r)(r - R_2), \\ \sigma_\theta &= a_0[(r - R_1)(r - R_2) + r(2r - R_1 - R_2)], \\ \sigma_z &= a_0 E_z \left[(r - R_1)(r - R_2) \left(\frac{2\mu}{E} \right) + \frac{\mu}{E} r(2r - R_1 - R_2) \right],\end{aligned}$$

$$\text{где } a_0 = \frac{1}{R_1^2} \sqrt{\frac{60\psi\sigma_{s_0}\varepsilon_{\text{ст}} \left(1 + \frac{m\varepsilon_{\text{ст}}^n}{(n+1)}\right)}{(7 \cdot \bar{K})(1 + \bar{R}^2 + \bar{R}^4) - (18 \cdot \bar{K})(1 + \bar{R}^2)\bar{R} + (15 \cdot \bar{K})\bar{R}^2}},$$

$$K = \left(\frac{1}{E} - E_z \frac{\mu^2}{E^2} \right),$$

$$\varepsilon_{\text{ст}} = 1,15 \cdot \ln \left(\frac{H_0}{H_1} \right) + \frac{\text{tg}\alpha_m}{\sqrt{3}} \text{ – степень пластической деформации при}$$

прокатке.

Поскольку при прокатке циркониевых труб заметной становится анизотропия в продольном и поперечном направлениях, коэффициенты деформационного упрочнения в этих направлениях будут разными, поэтому необходимо определить влияние анизотропии упругих свойств сплава на распределение технологических остаточных напряжений в циркониевых оболочках ТВЭЛов [12, 13].

Для определения технологических остаточных напряжений необходимо знать ряд механических характеристик, в том числе параметры кривой сопротивления деформации. Для крупнозернистого металла при температуре 77–673 °К деформационное упрочнение может быть описано выражением $\sigma_s = \sigma_{s_0} + m\varepsilon_{\text{ст}}^n$, где σ_{s_0} – исходное сопротивление деформации металла; m, n – эмпирические коэффициенты, характеризующие деформационное упрочнение [13].

Используя экспериментальные диаграммы (см. рис. 1) с помощью подбора наложения линий тренда в программной оболочке Excel был найден наиболее подходящий вид функции деформационного упрочнения сплавов циркония в продольном (рис. 2, а) и поперечном (рис. 2, б) направлениях. Достоверность расчета для сплава Zr – 1 % Nb составила 0,9837, для Zr – 2,5 % Nb – 0,9785, для Zr – 3 % Nb – 1 % Sn – 0,9791.

Далее были найдены распределения напряжений с учетом механических характеристик различных циркониевых сплавов и основных технологических параметров процесса холодного деформирования в предположении, что материал является анизотропным. Наиболее вероятными механическими свойствами циркония можно считать значения при 20 °С, модуль Юнга $E = 10^5$ МПа [10].

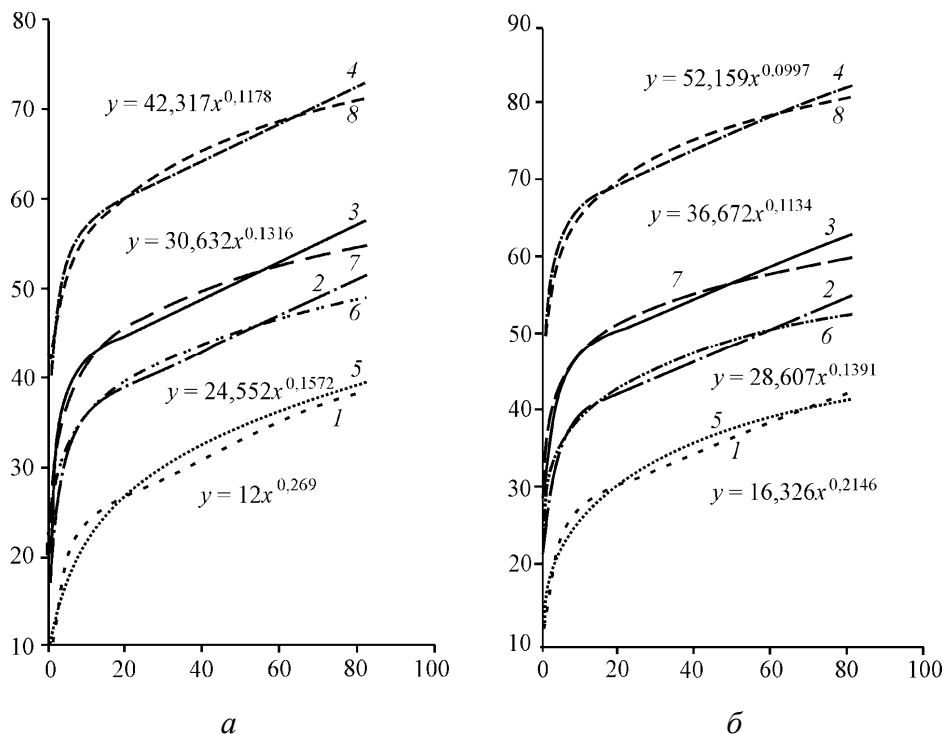


Рис. 2. Экспериментальные диаграммы растяжения сплавов: 1 – Zr – 1 % Nb; 2 – Zr – 2,5 % Nb; 3 – Zr – 3 % Nb – 1 % Sn; 4 – иодидный цирконий, а также их степенные аппроксимации 5–8 соответственно для продольного (а) и поперечного (б) направлений

На рис. 4 представлено распределение технологических остаточных напряжений по толщине стенки трубной заготовки с размерами, соответствующими размерам тонкостенных трубок для оболочек ТВЭЛов $R_1 = 15$ мм и $R_2 = 14,3$ мм, при параметре деформативности $\psi = 0,004$ и коэффициенте Пуассона $\mu = 0,33$ при степени пластической деформации $\epsilon_{ст} = 0,4$ (см. рис. 4) и $\epsilon_{ст} = 0,8$. Коэффициенты упрочнения m и n определялись из расчетных диаграмм растяжения (см. рис. 2, 3) для различных сплавов и направлений, соответственно. Вычисления были проведены для сплавов Zr – 3 % Nb – 1 % Sn; Zr – 2,5 % Nb; Zr – 1 % Nb.

Полученные результаты на рис. 3, 4 показывают, что остаточные напряжения возрастают с увеличением степени пластической деформации, а также зависят от механических свойств сплавов и в целом соответствуют известным экспериментальным данным по распределению остаточных напряжений в трубных изделиях [14, 15].

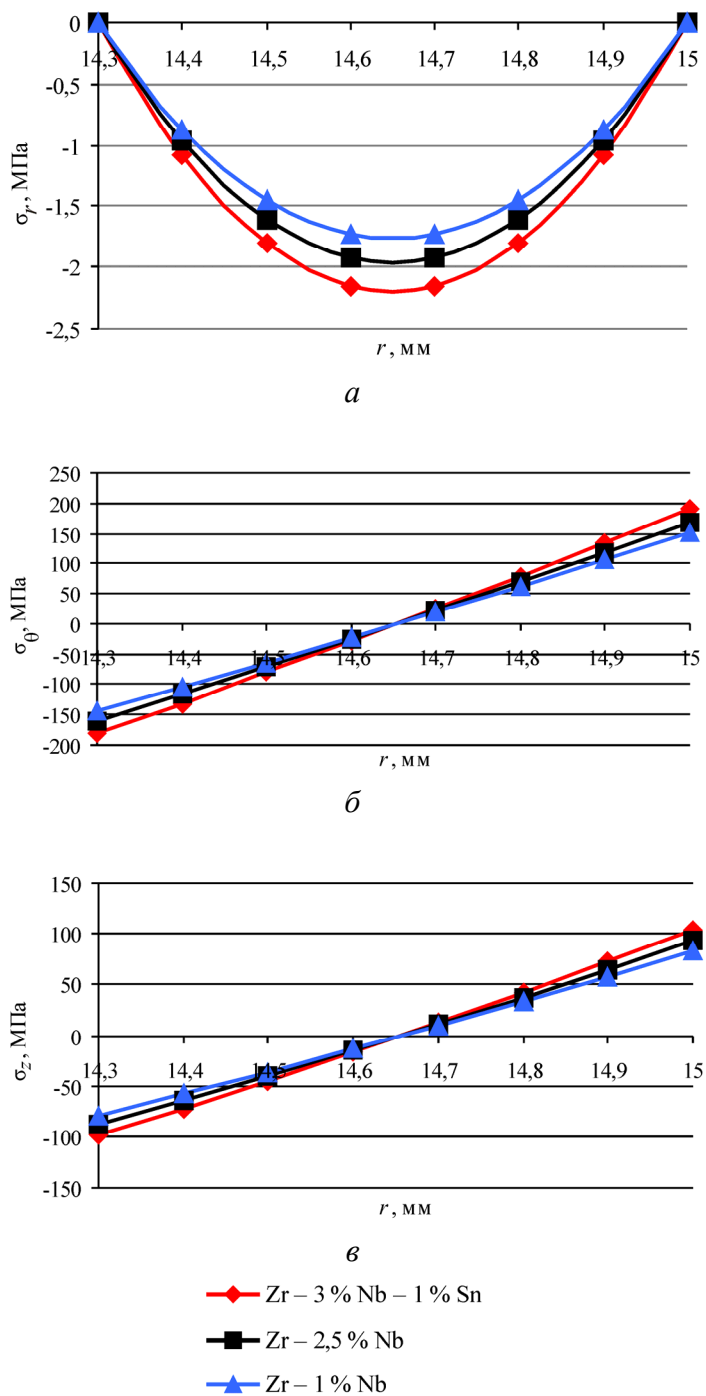


Рис. 3. Расчетные распределения радиальных (а), окружных (б) и осевых (в) остаточных напряжений в циркониевых ТВЭЛах при $\epsilon_{cr} = 0,4$

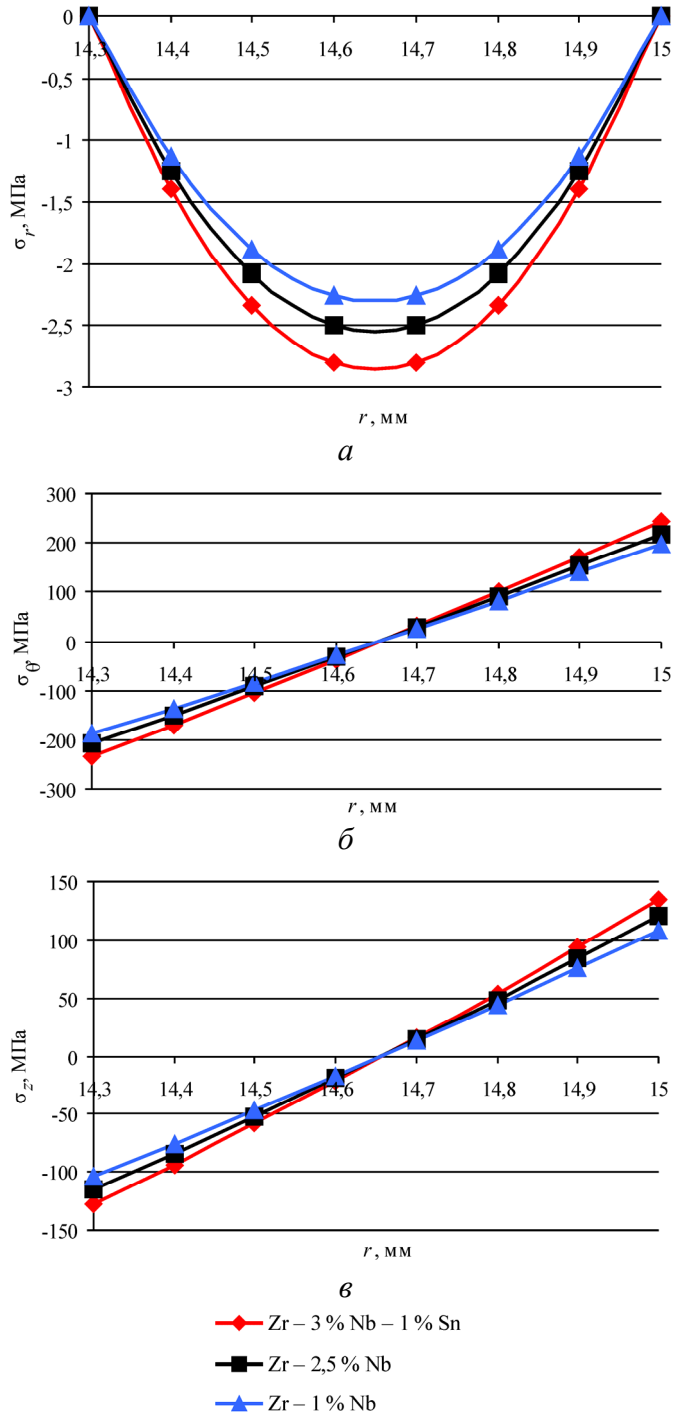


Рис. 4. Расчетные распределения радиальных (а), окружных (б) и осевых остаточных (в) напряжений в циркониевых ТВЭЛлах при $\epsilon_{cr} = 0,8$

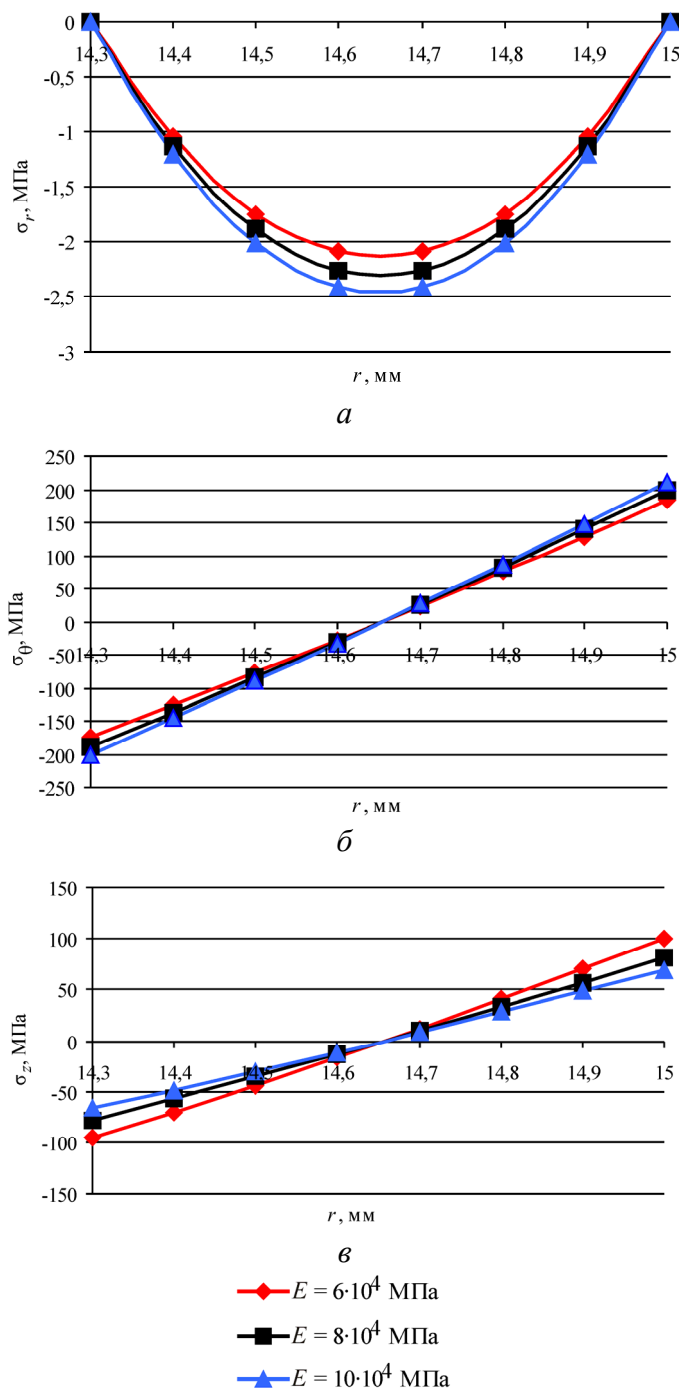


Рис. 5. Влияние анизотропии упругих свойств на величину радиальных (а), окружных (б) и осевых (в) остаточных напряжений в оболочке для сплава Zr – 2,5 % Nb

На рис. 5 представлено распределение технологических остаточных напряжений по сечению оболочки для различных модулей упругости $E = 6 \cdot 10^4$ МПа, $E = 10 \cdot 10^4$ МПа при степени пластической деформации $\varepsilon_{ст} = 0,5$. При этом все ранее приведенные значения остались неизменными. Вычисления были проведены для этих же сплавов для сплава Zr – 2,5 % Nb со степенью деформации 0,5.

В данной работе на основе энергетического подхода определены технологические остаточные напряжения, рассмотрено влияние степени пластической деформации и анизотропии материала на величину остаточных напряжений при изготовлении оболочек ТВЭЛов. Установлено влияние основных технологических параметров, а также анизотропии сплавов на уровень и характер распределения остаточных напряжений.

По результатам проведенных расчетов можно сделать вывод, что на величину технологических остаточных напряжений механические свойства сплавов, анизотропия материала и условия холодного пластического деформирования труб оказывают существенное влияние. При прокатке большое значение для величины остаточных напряжений имеет также уровень обжатия трубной заготовки, окружные и осевые остаточные напряжения на поверхности растягивающие, что при неблагоприятных условиях может привести к разрушению.

Таким образом, представлена методика учета технологических параметров пластического деформирования, которая позволяет учитывать остаточные напряжения, сформированные при производстве оболочек ТВЭЛов, с целью обеспечения прочности и качества готовой металлопродукции и исключения достижения предельных режимов деформирования.

Список литературы

1. Циркониевые сплавы в атомной энергетике / А.С. Займовский [и др.]. – М., 1981.
2. Мрочек Ж.А. Остаточные напряжения. – Минск: Технопринт, 2003. – 316 с.
3. Investigation of non-local cracking in layered stainless steel with nanostructured interface / X. Guo, A.Y.T. Leung, A.Y. Chen, H.H. Ruan, J. Lu // Scripta Materialia. – 2010. – Vol. 63, iss. 4. – P. 403–406.

4. Haghpanah B., Nayed-Hashemi H., Aziri A.V. Elasto-plastic stresses in a functionally graded rotating disk // *ASME J. Eng. Mater. Technol.* – 2012. – Vol. 134, iss. 2.

5. Liu Yu., Day M.L. Bending collapse of thin-walled circular tubes and computational application // *Thin-Walled Structures.* – 2008. – Vol. 46, iss. 4. – P. 442–450.

6. A fast and accurate analysis of the interacting cracks in linear elastic solids / D.F. Li, C.F. Li, S.Q. Shu, Z.X. Wang, J. Lu // *International Journal of Fracture.* – 2008. – Vol. 151. – P. 169–185

7. Ривкин Е.Ю. Прочность сплавов циркония. – М.: Наука, 1974.

8. Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В., Тиунов В.В. Технологические остаточные напряжения и их влияние на долговечность и надежность металлоизделий. – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2012.

9. Хан Х.Г. Теория упругости. Основы линейной теории и ее применение. – М.: Мир, 1988. – 343 с.

10. Перлин И.Л., Ерманок М.З. Теория волочения. – М.: Металлургия, 1971. – 448 с.

11. Никулин С.А. Циркониевые сплавы для ядерных реакторов. – М.: Учеба, 2007.

12. Webster R.T. The use of zirconium in plastic sheet, film and fiber production processes // *NACE Corrosion 79, Paper No. 9, March 12–16.* – Atlanta, 1979.

13. Филимонов Г.В., Никишов О.А. Прокатка циркониевых труб. – М.: Металлургия, 1988. – 104 с.

14. Вишняков Я.Д., Пискарев В.Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах. – М., 1989.

15. Трубы. Продукция Чепецкого механического завода (ЧМЗ) [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.chmz.net/product/zr/truba/> свободный (дата обращения: 21.11.2017).

References

1. Zajmovskij A.S. i dr. *Cirkonievye splavy v atomnoj jenergetike.* [Zirconium alloys in the nuclear industry]. Moscow: Energoatomizdat, 1981.

2. Mrochek Zh.A. *Ostatochnye naprjazhenija.* [Residual stresses]. Minsk: Tehnoprint, 2003. 316 p.

3. X. Guo, A.Y.T. Leung, A.Y. Chen, H.H. Ruan, J. Lu. Investigation of non-local cracking in layered stainless steel with nanostructured interface // *Scripta Materialia*, Volume 63, Issue 4, August 2010, P. 403-406.

4. B. Haghpanah, H. Nayeh-Hashemi, A. V. aziri. Elasto-plastic Stresses in a Functionally Graded Rotating Disk // *ASME J. Eng. Mater. Technol.*, April 2012, vol. 134, Issue 2, pp.

5. Yucheng Liu, Michael L. Day. Bending collapse of thin-walled circular tubes and computational application // *Thin-Walled Structures*. – 2008. – Vol. 46, Iss. 4. – P. 442-450.

6. Li D.F., Li C.F., Shu S.Q., Wang Z.X., Lu J. A fast and accurate analysis of the interacting cracks in linear elastic solids / *International Journal of Fracture*. June 2008. – Vol. 151. – P. 169-185

7. Rivkin E.Ju. Prochnost' splavov cirkonija. [The strength of zirconium alloys]. Moscow: Atomizdat, 1974. 168 p.

8. Kolmogorov G.L., Kuznecova E.V., Tiunov V.V. Tehnologicheskie ostatochnye naprjazhenija i ih vlijanie na dolgovechnost' i nadezhnost' metalloizdelij [Technological residual stresses and their effect on the longevity and reliability of hardware]. Perm': Izdatel'stvo PNIPU, 2012. 226 p.

9. Han H.G. Teorija uprugosti. Osnovy linejnoj teorii i ejo primenenie. Theory of elasticity. Bases of the linear theory and its application. M.: Mir, 1988. 343 p.

10. Perlin I.L., Ermanok M.Z. Teorija volochenija. [Theory of drawing.]. M.: Metallurgija, 1971, 448 p.

11. Nikulin S.A. Cirkonievye splavy dlja jadernyh reaktorov. [Zirconium alloys for nuclear reactors]. M: Ucheba. 2007.

12. Webster R.T. The Use of zirconium in plastic sheet, film and fiber production processes // Presented at NACE Corrosion 79, Paper No. 9, March 12-16, Atlanta, 1979.

13. Filimonov G.V., Nikishov O.A. Prokatka cirkonievych trub. [Rolling of zirconium pipes]. M.: Metallurgija, 1988, 104 p.

14. Vishnjakov Ja.D., Piskarev V.D. Upravlenie ostatochnymi naprjazhenijami v metallah i splavah. [Management of residual tension in metals and alloys]. M., 1989. 131 p.

15. Truby [Elektronnyj resurs]. Produkcija Chepeckogo mehanicheskogo zavoda (ChMZ). Pipes [Electronic resource]. Production of the Chepetsk Mechanical Plant (CMP). – URL: <http://www.chmz.net/product/zr/truba/svobodnyj>.

Получено 04.12.2017

Об авторах

Кузнецова Елена Владимировна (Пермь, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Динамика и прочность машин», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: mellen75@mail.ru).

Горбач Ольга Николаевна (Пермь, Россия) – студентка, кафедра «Динамика и прочность машин», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: dpm@pstu.ru).

Кузнецов Роман Владимирович (Пермь, Россия) – студент, кафедра «Динамика и прочность машин», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: dpm@pstu.ru).

Мелехин Анатолий Юрьевич (Пермь, Россия) – студент, кафедра «Динамики и прочность машин», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: dpm@pstu.ru).

Горбач Константин Владимирович (Пермь, Россия) – студент, кафедра «Динамика и прочность машин», Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: dpm@pstu.ru).

About the authors

Elena V. Kuznetsova (Perm, Russian Federation) – Ph.D. in Technical Sciences, Associate Professor, Department of Dynamic and Strength of Mechanism, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: mellen75@mail.ru).

Ol'ga N. Gorbach (Perm, Russian Federation) – Student, Department of Dynamic and Strength of Mechanism, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: dpm@pstu.ru).

Roman V. Kuznetsov (Perm, Russian Federation) – Student, Department of Dynamic and Strength of Mechanism, Perm National Research Polytechnic University (614990, 29, Komsomolsky av., Perm, Russian Federation, e-mail: dpm@pstu.ru).

Anatoliy Iu. Melekhin (Perm, Russian Federation) – Student, Department of Dynamic and Strength of Mechanism, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: dpm@pstu.ru).

Konstantin V. Gorbach (Perm, Russian Federation) – Student, Department of Dynamic and Strength of Mechanism, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: dpm@pstu.ru).