

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ПРОИЗВОДСТВЕ ЦИРКОНИЕВЫХ ЛИСТОВ

© 2016 г. **Е.В. Кузнецова, Г.Л. Колмогоров, А.Ю. Вавель**

Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ)

Статья поступила в редакцию 03.05.14 г., доработана 24.10.15 г., подписана в печать 30.10.15 г.

Рассмотрена экспериментально-теоретическая методика определения остаточных напряжений в полосных металлоизделиях из циркониевых сплавов, проявляющих трансверсально-изотропные свойства после холодной прокатки. Результаты исследований показали, что на поверхности полосы возникают значительные растягивающие поперечные и продольные остаточные напряжения. Характер их распределения качественно согласуется с известными закономерностями распределения этих величин при прокатке.

Ключевые слова: технологические остаточные напряжения, листовые металлоизделия, циркониевые сплавы, трансверсально-изотропные материалы, холодная прокатка полосы.

Кузнецова Е.В. – канд. техн. наук, доцент кафедры динамики и прочности машин ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29). E-mail: mellen75@mail.ru.

Колмогоров Г.Л. – докт. техн. наук, профессор той же кафедры. E-mail: dpm@pstu.ru.

Вавель А.Ю. – аспирант этой кафедры. E-mail: alla281@ya.ru.

Для цитирования: Кузнецова Е.В., Колмогоров Г.Л., Вавель А.Ю. Технологические остаточные напряжения при производстве циркониевых листов // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2016. No. 1. С. 26–31.
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2016-1-26-31.

Kuznetsova E.V., Kolmogorov G.L., Vavel A.Yu.

Process residual stresses in the production of zirconium sheets

The study reviews an experimental and theoretical method of residual stress detection in metal strips made of zirconium alloys showing transversely isotropic properties after cold rolling. Research results demonstrate significant transverse and longitudinal residual tensile stresses appearing on a strip surface. The nature of their distribution is qualitatively consistent with known patterns of distribution of these values during rolling process.

Key words: process residual stresses, metal sheets, zirconium alloys, transversely isotropic materials, strip cold rolling.

Kuznetsova E.V. – Dr. Sci. (Tech.), associate prof., Department of dynamics and strength of machines, Perm National Research Polytechnic University (PNRPU) (614990, Russia, Perm, Komsomolsky pr., 29). E-mail: mellen75@mail.ru.

Kolmogorov G.L. – Dr. Sci. (Tech.), prof., Department of dynamics and strength of machines, PNRPU. E-mail: dpm@pstu.ru.

Vavel A.Yu. – postgraduate student, Department of dynamics and strength of machines, PNRPU. E-mail: alla281@ya.ru.

Citation: Kuznetsova E.V., Kolmogorov G.L., Vavel A.Yu. Tekhnologicheskie ostatochnye napryazheniya pri proizvodstve tsirkonievyykh listov. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2016. No. 1. P. 26–31.
DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2016-1-26-31.

Введение

Листовая продукция из циркониевых сплавов востребована в атомной промышленности. В связи с разработкой в последнее время известных международных проектов атомной энергетики актуальным является расчет технологий производства деталей конструкций и оборудования для термоядерных реакторов. В атомной промышленности широко используют Zr-сплавы, так как они обладают высокой коррозионной стойкостью, пластичностью и малым сечением захвата тепловых нейтронов. Из листов этих сплавов толщиной 1–4 мм изготавливают кожухи кассет и каландровых

труб; листы и ленты толщиной 0,3–1,5 мм применяют для дистанционирующих решеток и других деталей кассет, для подвесок ТВЭЛов в кассетах-сборках, а также других деталей, находящихся в активной зоне реактора [1, 2].

Пластическая деформация при прокатке, как известно, сопровождается значительным изменением физико-механических и структурных свойств металла, называемым наклепом. Характер этих изменений зависит от химического состава и структуры металла, степени деформации, ее интенсивности и ряда других факторов. В результате

наклепа повышается сопротивление металлов деформации и снижаются их пластические свойства. В отдельных объемах металла формируются как сжимающие, так и растягивающие остаточные напряжения. Их неблагоприятное распределение приводит к нарушению планшентности и, следовательно, ухудшению качества готовой продукции. Для того чтобы качественно организовать технологический процесс прокатки, необходимо знание распределения остаточных напряжений в зависимости от параметров технологии.

Теоретические основы разработанной методики

Из литературы известны методы и подходы к определению остаточных напряжений [3, 4], однако в большинстве случаев задачи решены для случая изотропности свойств в металлоизделиях. Учет возможной анизотропии свойств при расчете технологических остаточных напряжений является весьма актуальной задачей в случае прокатки циркониевых листовых изделий, для сплавов которых характерна ортогональная анизотропия упругих свойств [1].

В работе [5] развивается энергетический метод оценки остаточных напряжений, в соответствии с которым потенциальная энергия упругих остаточных напряжений (U) определяется как доля (ее характеризует параметр ψ) работы, пошедшей на пластическое деформирование:

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

где U_d — работа, затраченная на пластическую деформацию при производстве изделий.

Работа пластического деформирования для единицы ширины полосы определяется методами механики обработки металлов давлением:

$$U_d = \int_{\varepsilon} \sigma_s d\varepsilon. \quad (2)$$

Здесь σ_s — сопротивление деформации обрабатываемого металла, зависящее от степени пластической деформации ε и описываемое соотношением

$$\sigma_s = \sigma_{s_0} + m\varepsilon^n, \quad (3)$$

где σ_{s_0} — начальный предел текучести материала; m и n — эмпирические коэффициенты, характеризующие деформационное упрочнение при пластическом деформировании [5].

Степень пластической деформации, входящая

в соотношения (2) и (3), определяется как сумма малых последовательных деформаций сдвига, усредненная по сечению заготовки и зависящая от основных технологических параметров процесса прокатки [6]:

$$\varepsilon^{cp} = 1,15 \ln \frac{h_0}{h} + \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\sqrt{3}}. \quad (4)$$

Здесь h_0 и h — высота полосы соответственно на входе и выходе; α — угол наклона образующей вала к оси деформирования при прокатке:

$$\operatorname{tg} \alpha = \sqrt{\frac{\Delta \bar{H}}{2 - \Delta \bar{H}}},$$

где $\Delta \bar{H} = \Delta H/R$; $\Delta H = h_0 - h$ — величина обжатия полосы за один проход; R — радиус прокатного вала (рис. 1).

После подстановки (3) в (2) с учетом (4) и интегрирования выражения (2) получаем уравнение для определения работы, затраченной на пластическое деформирование при прокатке с учетом степени и сопротивления пластической деформации, а также механических постоянных сплава:

$$U_d = \sigma_{s_i} \varepsilon_i^{cp} \left(1 + \frac{m(\varepsilon_i^{cp})^n}{n+1} \right) hb, \quad (5)$$

где b — ширина листового изделия (рис. 2); σ_{s_i} и ε_i^{cp} — соответственно сопротивление и степень деформации в i -м переходе при прокатке с учетом суммирования степени деформации по проходам.

Таким образом, в выражении (5) отражено изменение среднего значения σ_s по переходам с учетом деформационного упрочнения и накопления степени деформации.

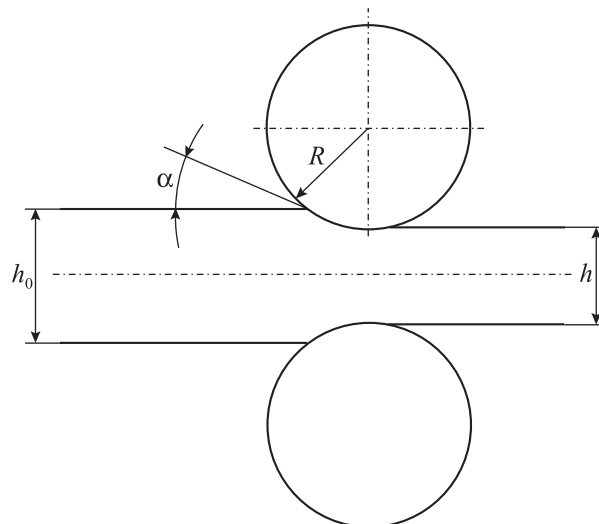


Рис. 1. Схема очага деформации при прокатке

Считая последеформационное состояние в листовых циркониевых изделиях упругим, определим входящую в энергетическое условие (1) потенциальную энергию остаточных напряжений, отнесенную к поперечному сечению для единичного объема (V) заготовки:

$$U = \frac{1}{2} \int_V \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dV, \quad (6)$$

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

Далее, решая задачу теории упругости с учетом граничных условий, можно получить соотношения между компонентами тензора остаточных напряжений и основными параметрами технологии с учетом механических свойств материала листа для случая упругой симметрии в ортогональном анизотропном теле.

Закон Гука записываем с использованием технических констант, таких как E_i — модули Юнга при растяжении—сжатии в соответствующих направлениях осей x, y, z ; G_{ij} — модули сдвига для плоскостей, параллельных координатным; ν_{ij} — коэффициенты Пуассона, характеризующие сокращение в направлении одной оси при растяжении в направлении другой (например, ν_{zx} — коэффициент, характеризующий сокращение в поперечном направлении x при растяжении в продольном направлении z) [7–10]:

$$\left. \begin{aligned} \varepsilon_x &= \frac{1}{E_x} \sigma_x - \frac{\nu_{yx}}{E_y} \sigma_y - \frac{\nu_{zx}}{E_z} \sigma_z, \\ \varepsilon_y &= -\frac{\nu_{xy}}{E_x} \sigma_x + \frac{1}{E_y} \sigma_y - \frac{\nu_{zy}}{E_z} \sigma_z, \\ \varepsilon_z &= -\frac{\nu_{xz}}{E_x} \sigma_x - \frac{\nu_{yz}}{E_y} \sigma_y + \frac{1}{E_z} \sigma_z, \\ \gamma_{xy} &= \frac{1}{G_{xy}} \tau_{xy}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Главные направления в точке могут быть и неравноценными, неэквивалентными. Из 12 упругих постоянных только 9 являются независимыми, так как в силу симметрии матрицы правой части уравнения обобщенного закона Гука всегда имеют место равенства

$$E_x \nu_{yx} = E_y \nu_{xy}, \quad E_y \nu_{zy} = E_z \nu_{yz}, \quad E_z \nu_{zx} = E_x \nu_{xz}.$$

Компоненты тензора напряжений $\sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$ определяются из уравнений равновесия и граничных условий [5]:

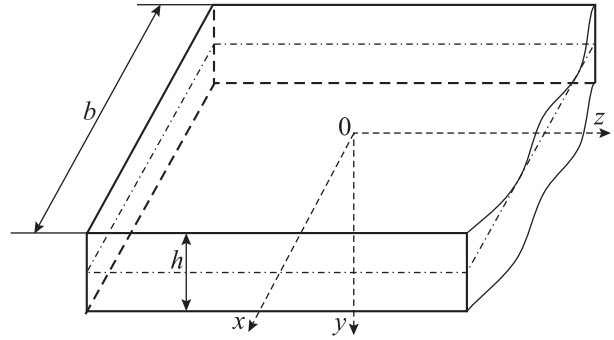


Рис. 2. Геометрические характеристики готового листа

$$\begin{aligned} \sigma_x &= a_0 \left(y^2 - \frac{h^2}{12} \right) \left(\frac{b^2}{4} - x^2 \right), \\ \sigma_y &= \frac{a_0}{3} \left(\frac{b^2}{4} - 3x^2 \right) \left(4y^2 - \frac{h^2}{4} \right), \\ \tau_{xy} &= \frac{4a_0 xy}{3} \left(\frac{b^2}{4} - x^2 \right) \left(y^2 - \frac{h^2}{4} \right), \end{aligned} \quad (8)$$

а осевое напряжение — из допущения об отсутствии осевых деформаций для плоскодеформированного состояния, которое для случая ортотропного материала имеет вид

$$\begin{aligned} \sigma_z &= a_0 E_z \left(\frac{\nu_{xz}}{E_x} \left(y^2 - \frac{h^2}{12} \right) \left(\frac{b^2}{4} - x^2 \right) + \right. \\ &\quad \left. + \frac{1}{3} \frac{\nu_{yz}}{E_y} \left(\frac{b^2}{4} - 3x^2 \right) \left(4y^2 - \frac{h^2}{4} \right) \right), \end{aligned} \quad (9)$$

где a_0 — параметр, определяемый из энергетического условия (1) и характеризующий распределение остаточных напряжений по сечению заготовки.

Выражение (6) для потенциальной энергии после подстановки компонент тензора остаточных напряжений (8) и (9) с учетом закона Гука (7) примет вид

$$U = 10^{-6} a_0^2 b^{14} (j \bar{h}_j + p \bar{h}_p), \quad (10)$$

где

$$\bar{h} = h/b,$$

$$\begin{aligned} h_j &= -0,98 \bar{h}^9 + 0,96 \bar{h}^7 - 0,12 \bar{h}^{13} + \\ &\quad + 0,52 \bar{h}^{11} + 0,12 \bar{h}^3 - 0,52 \bar{h}^5, \end{aligned}$$

$$h_p = -0,06 b \bar{h}^3 + 0,31 b \bar{h}^5 + -0,65 \bar{h}^7 + 0,72 \bar{h}^9 - 0,54 \bar{h}^{11},$$

$$j = 1, 2, 3.$$

Подставляя выражения (5) и (10) в энергетическое условие (1), найдем параметр a_0 , характеризующий распределение остаточных напряжений по толщине листа:

$$a_0 = \frac{10^3}{b^7} \left[\frac{2\psi U_d E_y E_x}{(v_{yx} + v_{zx} v_{yz}) E_x \bar{h}_j + (v_{xy} + v_{zy} v_{xz}) E_y \bar{h}_j + (1 - v_{zy} v_{yz}) \bar{h}_p E_x} \right]^{1/2}. \quad (11)$$

Интеграл в выражении (6) решался с помощью программного комплекса MathCAD (demo-версия).

В уравнение (11) для определения параметра a_0 входят основные механические константы, учитывающие анизотропию свойств материала, геометрические характеристики заготовки, эмпирические коэффициенты упрочнения, а также технологические параметры процесса прокатки. Анализируя выражения (8), (9) с учетом (11) для остаточных напряжений, очевидно, что в сечении полосы имеют место как растягивающие, так и сжимающие остаточные напряжения.

Практическая реализация методики

Найдем величину технологических остаточных напряжений в листах из циркониевого сплава Н-2,5 после прокатки. В Zr-сплавах проявляется ортогональная анизотропия механических свойств, особенно в отношении модуля упругости. Например, для деталей из Zr-сплавов его величина в поперечном направлении, как правило, на 15 % выше, чем в направлении прокатки [11].

Для случая ортогональной анизотропии упругих свойств выражение (10) с учетом соотношения (11) можно записать следующим образом:

$$U = \frac{a_0^2 b^{14}}{10^6} \left(\frac{\bar{h}_x}{E_x} + \frac{(1 - \nu^2) \bar{h}_y}{E_y} \right), \quad (12)$$

тогда

$$a_0 = \frac{10^3}{b^7} \left[\frac{\psi U_d E_y E_x}{E_y \bar{h}_x + (1 - \nu^2) \bar{h}_y E_x} \right]^{1/2}, \quad (13)$$

где

$$\bar{h}_x = 5,4\bar{h}^3 - 23,4\bar{h}^5 + 43,2\bar{h}^7 - 44,1\bar{h}^9 + 23,4\bar{h}^{11} + 5,4\bar{h}^{13},$$

$$\bar{h}_y = 5\bar{h}^5 - 17\bar{h}^7 + 23\bar{h}^9 - 28\bar{h}^{11} + 6\bar{h}^{13}.$$

Зная выражение для параметра a_0 , можно найти значения напряжений по всему объему полосы. В ее сечении имеют место как растягивающие, так и сжимающие остаточные напряжения. Макси-

мальные остаточные напряжения σ_x действуют в центре полосы на ее поверхности ($x = 0, y = \pm h/2$), а максимальные остаточные напряжения σ_y — на боковой поверхности в центре ($x = \pm b/2, y = 0$).

Обсуждение результатов

В работах [11–13], содержащих данные по оценке упругих свойств сплавов циркония, отмечено различие значений модуля упругости в направлении прокатки и поперечном направлении — в последнем случае его величина, как правило, на 10–15 % выше. Модули упругости сплавов Zr–1%Nb и Zr–2,5% Nb при комнатной температуре (соответственно $9,3 \cdot 10^3$ и $9,1 \cdot 10^3$ кгс/мм²) мало чем отличаются от модуля упругости чистого циркония, но несколько меньше, чем у сплавов типа «циркалой». Исследования показали, что ортогональная анизотропия механических свойств Zr-сплавов проявляется, в частности, в отношении модулей упругости, а вот значения коэффициентов Пуассона для подобных сплавов практически не отличаются по направлениям.

Таким образом, с помощью энергетического подхода можно определить остаточные напряжения, формируемые при прокатке полосы в холодном состоянии, например, для деталей из цирко-

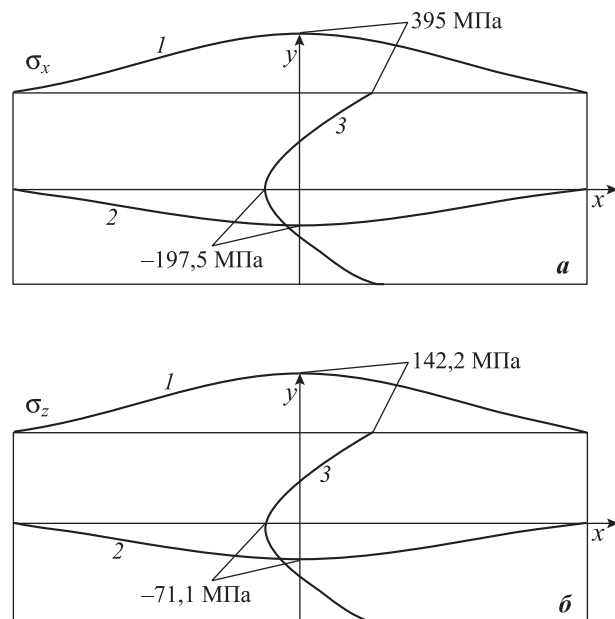


Рис. 3. Распределения поперечных σ_x (а) и продольных σ_y (б) остаточных напряжений в листовых изделиях из циркониевого сплава Zr–2,5%Nb в различных сечениях

1 – на внешней поверхности, 2 – срединной поверхности, 3 – по толщине (в центре)

ниевых сплавов, используемых в оборудовании для ядерных реакторов.

На рис. 3 представлены распределения технологических остаточных напряжений в различных сечениях листовой заготовки из циркониевого сплава Zr–2,5%Nb при $b = 600$ мм, $h = 1,4$ мм, $\epsilon^{cp} = 0,54$, $E_z = 8,3 \cdot 10^3$ кгс/мм², $E_x \approx E_y = 9,1 \cdot 10^3$ кгс/мм², $\nu_{ij} = \nu = 0,31$. Видно, что максимальными остаточными напряжениями являются поперечные растягивающие напряжения σ_x на поверхности в центре полосы, которые в области срединной поверхности принимают отрицательные значения. Продольные напряжения (σ_z) имеют подобный характер распределения, однако их значения ниже в 1,5–2,0 раза. Величины напряжений, действующих по толщине (σ_y), малы по сравнению с продольными и поперечными.

Заключение

Представленная методика определения технологических остаточных напряжений в листовых металлоизделиях после прокатки с учетом параметров процесса прокатного производства и механических свойств материала заготовки реализована для ортогонально-анизотропных материалов. Результаты показали особенности напряженного состояния в металлопрокате из циркониевых сплавов, аналогичные известным из литературы [14–16]. Определены технологические остаточные напряжения после холодной прокатки листовых изделий из циркониевых сплавов, применяемых в атомной промышленности для дистанционирующих решеток и других деталей кассет, подвесок ТВЭЛов в кассетах-сборках, находящихся в активной зоне реактора.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 13-08-01196).

Литература

1. *Займовский А.С.* Циркониевые сплавы в атомной энергетике. М.: Энергоатомиздат, 1981.
2. *Kolmogorov G., Kuznetsova E., Filippov V.* Residual stresses end accuracy of pipe preparations by manufacture zirconium tubes for the nuclear industry // Proc. 7-th Europ. conf. on residual stresses (ECRS 7). Berlin, 2006. P. 703–708.
3. *Guo X., Leung A.Y.T., Chen A.Y., Ruan H.H., Lu J.* Investigation of non-local cracking in layered stainless steel with

nanostructured interface // Scr. Mater. 2010. Vol. 63. Iss. 4. P. 403–406.

4. *Haghpanah B., Nayeb-Hashemi H., Vaziri A.* Elasto-plastic stresses in a functionally graded rotating disk // ASME J. Eng. Mater. Technol. 2012. Vol. 134. Iss. 2. P. 1–133.
5. *Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В., Тиунов В.В.* Технологические остаточные напряжения и их влияние на долговечность и надежность металлоизделий. Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2012.
6. *Кузнецова Е.В., Колмогоров Г.Л., Трофимов В.Н., Вавель А.Ю.* О степени пластической деформации при прокатке листов // Прикладная математика, механика и процессы управления: Матер. 2-й Росс. науч.-техн. интернет-конф. (10–15 нояб. 2014 г.). Пермь: ПНИПУ, 2014. URL: <http://pmmppu.pstu.ru/conf2014/>
7. *Лехницкий С.Г.* Теория упругости анизотропного тела. М.: Наука, 1977.
8. *Тимошенко С.П., Гудьер Дж.* Теория упругости. М.: Наука, 1975.
9. *Цветков С.В.* Упругая и пластическая анизотропия // Крупногабаритные трансформируемые космические конструкции и материалы для перспективных ракетно-космических систем: Спецвыпуск. Вестн. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2012. С. 157–163.
10. *Родионова З.Н., Есипенко Л.П., Шестакова Е.Б.* Напряженное состояние трансверсально-изотропного полупространства // Вестн. Вост.-Казах. гос. техн. ун-та им. Д. Серикбаева. 2009. No. 3. С. 37–42.
11. *Ривкин Е.Ю., Родченков Б.С., Филатов В.М.* Прочность сплавов циркония. М.: Атомиздат, 1974.
12. *Никулин С.А.* Циркониевые сплавы для ядерных реакторов. М.: Учеба, 2007.
13. *Arutyunyan A.R., Arutyunyan R.A.* The fatigue fracture criterion based on the latent energy approach // Engineering. 2010. No. 2. P. 318–321.
14. *Webster R.T.* The use of zirconium in plastic sheet, film and fiber production processes // NACE Corrosion 79 (Atlanta, 12–16 March 1979). Paper No. 9.
15. *Мрочек Ж.А.* Остаточные напряжения. Минск: Технопринт, 2003.
16. *Синельников Л.П., Аверин С.А., Панченко В.Л., Евсеев М.В.* Исследование состояния циркониевой трубы и переходников канала СУЗ РБМК-1000 после 26 лет эксплуатации // Сб. докл. 7-й Росс. конф. по реакторному материаловедению (Дмитровград, 8–12 сент. 2003 г.). Заречный: СФ НИКИЭТ, 2003. С. 125–129.

References

1. *Zaimovsky A.S.* Tsirkonievye splavy v atomnoi energitike [Zirconium alloys in the nuclear industry]. Moscow: Energoatomizdat, 1981.
2. *Kolmogorov G., Kuznetsova E., Filippov V.* Residual stresses end accuracy of pipe preparations by manufacture zirconium tubes for the nuclear industry // Proc. 7-th Europ. conf. on residual stresses (ECRS 7). Berlin, 2006. P. 703–708.

- nium tubes for the nuclear industry. In: *Proc. 7-th Europ. conf. on residual stresses (ECRS 7)*. Berlin, 2006. P. 703—708.
3. Guo X., Leung A.Y.T., Chen A.Y., Ruan H.H., Lu J. Investigation of non-local cracking in layered stainless steel with nanostructured interface. *Scr. Mater.* 2010. Vol. 63. Iss. 4. P. 403—406.
 4. Haghpanah B., Nayeb-Hashemi H., Vaziri A. Elasto-plastic stresses in a functionally graded rotating disk. *ASME J. Eng. Mater. Technol.* 2012. Vol. 134. P. 1—133.
 5. Kolmogorov G.L., Kuznetsova E.V., Tiunov V.V. Tehnologicheskie ostatochnye napryazheniya i ih vliyanie na dolgovechnost' i nadezhnost' metalloizdelii [Technological residual stresses and their effect on the longevity and reliability of hardware]. Perm': Izdatel'stvo PNIPU, 2012.
 6. Kuznetsova E.V., Kolmogorov G.L., Trofimov V.N., Vavel A.Yu. O stepeni plasticheskoi deformatsii pri prokatke listov [The degree of plastic deformation during rolling of sheets]. In: *Prikladnaya matematika, mekhanika i protsessy upravleniya* [Applied mathematics, mechanics and management processes]. 2-ya Rossiiskaya nauchno-tehnicheskaya internet-konferentsiya. Perm': PNIPU, 2014. URL: <http://pmpu.pstu.ru/conf2014/>
 7. Lehnitsky S.G. Teoriya uprugosti anizotropnogo tela [The theory of elasticity of an anisotropic body]. Moscow: Nauka, 1977.
 8. Timoshenko S.P., Gud'er Dzh. Teoriya uprugosti [Theory of elasticity]. Moscow: Nauka, 1975.
 9. Tsvetkov S.V. Uprugaya i plasticheskaya anizotropiya [The elastic and plastic anisotropy]. In: *Krupnogabaritnye transformiruemye kosmicheskie konstruksii i materialy dlya perspektivnykh raketno-kosmicheskikh sistem* [The large-size transformed space designs and materials for perspective space-rocket systems]. Vestnik MGTU im. N.Ye. Baumana. Ser. Mashinostroeniye. 2012. P. 157—163.
 10. Rodionova Z.N., Esipenko L.P., Shestakova E.B. Napryazhennoe sostoyanie transversal'no-izotropnogo poluprostranstva [Stress state transversely isotropic half-space]. *Vestnik Vostochno-Kazahstanskogo gosudarstvennogo tehnikeskogo universiteta im. D. Serikbaeva*. 2009. No. 3. P. 37—42.
 11. Rivkin E.Yu., Rodchenkov B.S., Filatov V.M. Prochnost' splavov cirkoniya [The strength of zirconium alloys]. Moscow: Atomizdat, 1974.
 12. Nikulin S.A. Tsirkonievye splavy dlya yadernykh reaktorov [Zirconium alloys for nuclear reactors]. Moscow: Ucheba, 2007.
 13. Arutyunyan A.R., Arutyunyan R.A. The fatigue fracture criterion based on the latent energy approach. *Engineering*. 2010. No. 2. P. 318—321.
 14. Webster R.T. The use of zirconium in plastic sheet, film and fiber production processes. *NACE Corrosion 79* (Atlanta, 12—16 March 1979). Paper No. 9.
 15. Mrochek Zh.A. Ostatochnye napryazheniya [Residual stresses]. Minsk: Tehnoprnt, 2003.
 16. Sinel'nikov L.P., Averin S.A., Panchenko V.L., Evseev M.V. Issledovanie sostoyaniya tsirkonievoi truby i perehodnikov kanala SUZ RBMK-1000 posle 26 let ekspluatatsii [Investigation of zirconium tubes and adapters CPS channel of RBMK-1000 after 26 years of service]. In: *Sbornik dokladov 7-i Rossiiskoi konferentsii po reaktornomu materialovedeniyu* (Dimitrovgrad, 8—12 Sept. 2003). Za-rechnyi: SF NIKI ET, 2003. P. 125—129.