

УДК 621.774.37: 539.319

**Е.В. Кузнецова, Д.А. Мелехин,  
Е.С. Елистратова, Д.В. Виндокуров**

Пермский национальный исследовательский политехнический  
университет, Пермь, Россия

## **ПОВЕДЕНИЕ ОБОЛОЧЕК ТЕПЛОВЫДЕЛЯЮЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ПРИ ЭКСПЛУАТАЦИИ С УЧЕТОМ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ**

Представлена методика учета влияния эксплуатационных режимов с учетом остаточных напряжений на преждевременное растрескивание циркониевых оболочек тепловыделяющих элементов (ТВЭЛ), используемых в термоядерных реакторах. Классические подходы прикладной механики применены к расчетам предельно допустимых нагрузок и технологических остаточных напряжений в тонкостенных оболочках ТВЭЛов. Методика применена для определения максимальных окружных напряжений в эксплуатационных режимах для различных значений внутреннего давления для оболочек с разными толщинами стенки для случая, когда эксплуатационные режимы известны. Рассчитаны предельно допустимые напряжения в зависимости от уровня окружных остаточных напряжений для различных сплавов циркония в случае, когда уровни остаточных напряжений определены.

**Ключевые слова:** тепловыделяющие элементы (ТВЭЛ), оболочки тепловыделяющих элементов, термоядерные реакторы, циркониевые сплавы, эксплуатационные режимы, предельно допустимые напряжения, остаточные напряжения.

**E.V. Kuznetsova, D.A. Melekhin,  
E.S. Elistratova, D.V. Vindokurov**

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation

## **BEHAVIOR OF COVERS OF THE HEATALLOCATING ELEMENTS AT OPERATON TAKING INTO ACCONT RESIDUAL STRESSES**

In work the technique of taking note of the operational modes taking into account residual tension on premature cracking of zirconium covers of the heatallocating elements (TVEL) used in thermonuclear reactors is presented. Classical approaches of applied mechanics are applied to calculations maximum-permissible loadings and technological residual tension in thin-walled covers of fuel elements. The technique is applied to determination of the maximum district tension in the operational modes for various values of internal pressure for covers with different thickness of a wall for a case when the operational modes are known. Maximum permissible tension depending on the level of district residual tension for various alloys of zirconium in a case when levels of residual tension are determined is calculated.

**Keywords:** heatallocating elements (TVEL), covers of the heatallocating elements, thermonuclear reactors, zirconium alloys, the operational modes, maximum permissible stresses, residual stresses.

В связи с увеличением опасности повреждения и разрушения оболочек тепловыделяющих элементов при воздействии высоких уровней нагружения, температур и коррозионной среды в настоящее время в России и за рубежом активно ведутся работы по проверке и обоснованию возможности использования уже имеющихся сплавов циркония, а также по разработке и исследованию новых модифицированных сплавов в качестве материала для изделий активной зоны реакторов в новых эксплуатационных условиях [1].

Многолетний опыт отечественного и зарубежного реакторостроения показал, что успех создания конструкционных материалов для оболочек ТВЭЛов достигается при обеспечении высокого уровня трех основных факторов: комплекса физических, механических и технологических свойств (включая свариваемость), радиационной стойкости, совместимости с теплоносителем и топливным материалом.

К оборудованию ядерных реакторов предъявляют повышенные требования по надежности, безопасности и экологическим характеристикам. Существенно повысились также требования к рабочим параметрам оболочек ТВЭЛов (рабочие температуры – 320–710 °С; достигаемые повреждающие дозы – 140–180 с.н.а.; окружные напряжения до – 80–120 МПа; увеличение ресурса – до 5–7 лет) [2].

Помимо эксплуатационных напряжений, после различных технологий изготовления и обработки с применением пластической деформации в цилиндрических заготовках могут появиться остаточные напряжения. Уровень технологических остаточных напряжений определяется в основном технологическими параметрами процесса изготовления, где особое значение имеет неравномерность пластических деформаций. Остаточные напряжения могут достигать значительных величин, вплоть до предела текучести и прочности материала, что часто приводит к разрушению конструкций еще при хранении или в первые часы эксплуатации при достаточно низком уровне эксплуатационных нагрузок. Опыт эксплуатации конструкций в различных областях техники и результаты многочисленных экспериментов показывают, что остаточные напряжения существенно влияют на надежность и долговечность машин и механизмов. Необходимо отметить, что остаточные напряжения могут играть как положительную, так и отрицательную роль в изменении прочности, жесткости, устойчивости и износостойкости изделий, определяя тем самым их работоспособ-

ность в эксплуатации при различных видах и условиях нагружения [3]. При благоприятном распределении остаточных напряжений возрастают прочность, работоспособность и долговечность металлопроката или изготовленных из него изделий. Имеются некоторые немногочисленные примеры благоприятного влияния остаточных напряжений на качество изделий и их дальнейшее поведение под нагрузкой. Сжимающие остаточные напряжения обычно играют положительную роль, так как они являются самозалечивающимися, однако для длинных тонких изделий под вертикальной нагрузкой сжатия возникает опасность потери устойчивости.

При воздействии внешних нагрузок в процессе дальнейшей механической обработки или эксплуатации остаточные напряжения, суммируясь с напряжениями от внешних сил, могут превысить предел упругости, что приводит к неравномерной пластической деформации, потере устойчивости, короблению, искривлению, скручиванию и т.д.

При высоком уровне напряжений и развитых микротрещинах иногда достаточно легких ударных нагрузок для наступления хрупкого излома. Понижение предела усталости также результат воздействия растягивающих остаточных напряжений в сочетании с напряжениями от внешних нагрузок, особенно растягивающих. ТВЭЛы являются прецизионными деталями, разрушение которых может привести к катастрофе. Именно поэтому необходимо разрабатывать методики учета технологических остаточных напряжений в эксплуатационных условиях циркониевых труб.

В предположении, что остаточные напряжения после прокатки и окончательной термообработки имеют уровень ниже предела упругости циркониевого сплава, можно учесть остаточные напряжения по принципу суперпозиции совместно с эксплуатационными с целью определения предельных рабочих режимов, а также при оценке влияния геометрии трубной заготовки и механических свойств циркониевого сплава.

Как показывают расчеты [4], при действии внутреннего давления в цилиндрических оболочках максимальными являются окружные (тангенциальные) напряжения, которые можно определить с учетом остаточных в виде

$$\sigma_{\theta}^{\max} = \sigma_{\theta}^{\text{ост}} + \sigma_{\theta}^{\text{эксп}}, \quad (1)$$

или в случае решения безмоментной теории оболочек [5] в виде

$$\sigma_{\theta}^{\max} = \sigma_{\theta}^{\text{ост}} + \frac{PR_3}{h}. \quad (2)$$

Для определения предельно допустимых эксплуатационных режимов воспользуемся критерием главных нормальных напряжений, согласно которому критериальное условие имеет вид

$$\sigma_{\theta}^{\max} < [\sigma_{\text{в}}], \quad (3)$$

где  $\sigma_{\text{в}}$  – предел прочности сплава.

При подстановке выражения (2) в условие (3) с учетом формулы (1) и преобразований можно найти соотношение для нахождения предельно допустимых рабочих давлений в ТВЭЛах при известных уровнях технологических остаточных напряжений для различных циркониевых сплавов (таблица) и геометрии оболочек.

#### Механические свойства и химический состав основных циркониевых сплавов оболочек ТВЭЛов [6]

Сплав	Химический состав	$\sigma_{\text{в}}$	$\sigma_{0,2}$	$\delta, \%$
Э110	Zr – 1 % Nb	370	340	32
Э125	Zr – 2,5 % Nb	450	280	25
Э635	Zr – 1 % Nb (1,1–1,3) % Sn – (0,3–0,4) %	650	580	21

В случае, если уровни остаточных напряжений известны, согласно разработанной методике можно найти предельные внутренние давления в оболочках ТВЭЛов. На рис. 1 представлены расчетные значения предельно допустимых внутренних давлений в зависимости от уровня окружных остаточных напряжений для различных сплавов циркония при радиусе срединной поверхности оболочки  $R_3 = 4,215$  мм, с толщиной стенки  $h = 0,7$  мм.

Из рис. 1 видно, что уровень предельных давлений снижается при наличии высоких окружных остаточных напряжений. При этом уровень допустимых давлений выше в оболочках из циркониевого сплава Э110, ниже – для сплавов 125 и Э635 соответственно.

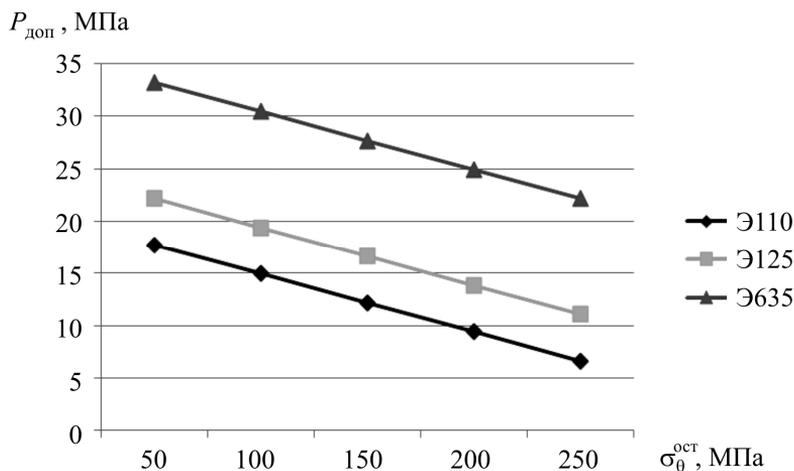


Рис. 1. Расчетные значения предельно допустимых напряжений в зависимости от уровня окружных остаточных напряжений для различных сплавов циркония при радиусе срединной поверхности оболочки  $R_3 = 4,215$  мм, с толщиной стенки  $h = 0,7$  мм

Разработанная методика позволяет также оценивать влияние толщины стенки оболочки и радиуса срединной поверхности оболочки на допустимые эксплуатационные давления с учетом остаточных напряжений, сформированных при изготовлении и обработке оболочечных труб.

Исследования остаточных напряжений при холодной прокатке труб описаны во многих работах. Возникновение остаточных напряжений весьма нежелательно. Они могут вызвать значительное изменение размеров трубы после деформации, а также привести к разрушению [7]. Наличие остаточных напряжений в металле ухудшает физико-механические свойства. Формирование самоуравновешенной системы остаточных напряжений связано с неравномерностью пластической деформации по толщине стенки, периметру поперечного сечения и длине трубы. Высокие степени деформации по толщине стенки трубной заготовки при прокатке объясняются тем, что силы трения, которые действуют на металл со стороны оправки, в большей мере препятствуют продольной деформации металла, чем силы трения со стороны рабочей поверхности валка. Это происходит из-за так называемой волны, раскатываемой валками [8].

В работе [9] найдено распределение остаточных напряжений первого рода по толщине стенки трубы, которые достигают 10 МПа

в некоторых опасных зонах. Притом изменения остаточных напряжений первого рода по периметру поперечного сечения, длине конуса деформации сечения и длине конуса деформации объясняются неравномерностью деформации металла в выпусках и в зоне. Весомая разница уровня остаточных напряжений в обкатанном и необкатанном рабочих участках объясняется условиями деформации металла в исследуемых сечениях. Таким образом, после каждого поворота трубы происходит алгебраическое суммирование остаточных напряжений, в результате которых величина их, как правило, уменьшается. Проводимая после прокатки термообработка значительно снижает уровень остаточных напряжений. Однако известно, что после окончательной термообработки трубы из циркониевых сплавов, как правило, подвергают правке – незначительной пластической деформации (1–4 %), которая, в свою очередь, может способствовать наведению и перераспределению дополнительных остаточных напряжений. Уровень и характер распределения остаточных напряжений после правки зависят от режима правки и механических свойств трубной заготовки после термообработки.

Исследование остаточных напряжений в трубах размером 88 × 4 мм из сплава Э125 представлено в работе [10]. Напряжения определялись методом тензометрирования по анализу тензодатчиков, наклеенных на наружной и внутренней поверхности кольца шириной 10 мм. Средние значения деформаций определяли методом Давыденкова по замерам деформаций участков кольца до и после его нарезки. Среднее значение остаточного окружного (тангенциального) напряжения на наружной поверхности определялось по формуле

$$\sigma = \frac{E\delta h}{D_{\text{ср}}^2},$$

где  $E$  – модуль Юнга, МПа;  $\delta$  – изменение диаметра, мм;  $D_{\text{ср}}$  – средний диаметр трубы, мм.

Исследования показали, что величина окружных остаточных напряжений может достигать 220 МПа. Осевые (продольные) остаточные напряжения определялись после вырезки полос длиной 200 мм и шириной 10 мм.

Таким образом, зная уровень остаточных напряжений, сформированных в процессе производства, можно учесть их наличие при расчете эксплуатационных режимов циркониевых оболочек ТВЭЛов.

Зная эксплуатационные режимы в оболочках ТВЭЛов, построим зависимость максимальных окружных напряжений от внутреннего рабочего давления  $P_{\text{раб}}$  от 8 до 16 МПа с учетом технологических остаточных напряжений для циркониевых труб с различными толщинами стенки  $h = 0,3-0,9$  мм (рис. 2).

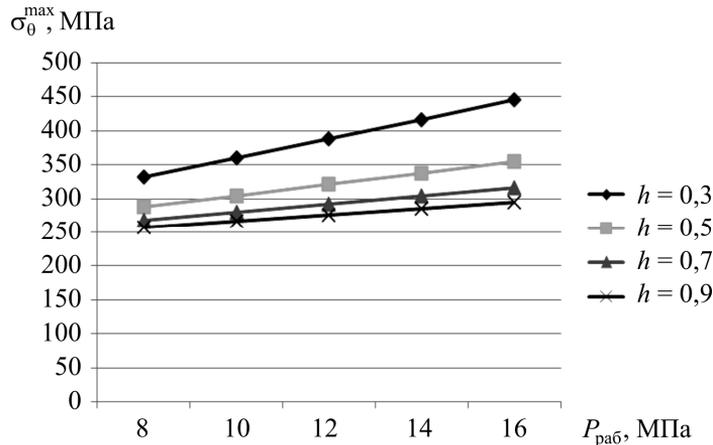


Рис. 2. Зависимость максимальных окружных напряжений в эксплуатационных режимах при внутреннем рабочем давлении  $P_{\text{раб}}$  от 8 до 16 МПа с учетом технологических остаточных напряжений для циркониевых труб с различными толщинами стенки  $h = 0,3-0,9$  мм

Из рис. 2 видно, что диапазон изменения максимальных окружных напряжений находится в пределах от 250 до 450 МПа. Это достаточно высокий уровень, так как пределы прочности для циркониевых сплавов составляют от 380 до 650 МПа, т.е. в эксплуатационных режимах необходимо контролировать уровень остаточных напряжений, так как может быть достигнут условный предел прочности и наступит разрушение, что недопустимо для таких прецизионных деталей, как оболочки ТВЭЛов.

В литературе отмечено, что эксплуатационные уровни внутренних давлений достигают 16 МПа. На рис. 3 изображены предельные уровни окружных остаточных напряжений в зависимости от толщины стенки оболочки из циркониевых сплавов Э110, Э125, Э635.

Из рис. 3 видно, что при известных уровнях рабочих внутренних давлений в циркониевых оболочках из условий прочности допустимы остаточные напряжения от 50 до 250 МПа. Как показывают исследования, это реальные значения по остаточным напряжениям, которые

имеют место быть после прокатки, ряда технологических операций и термообработки. Уровень предельных напряжений растет с увеличением толщины стенки циркониевой оболочки.

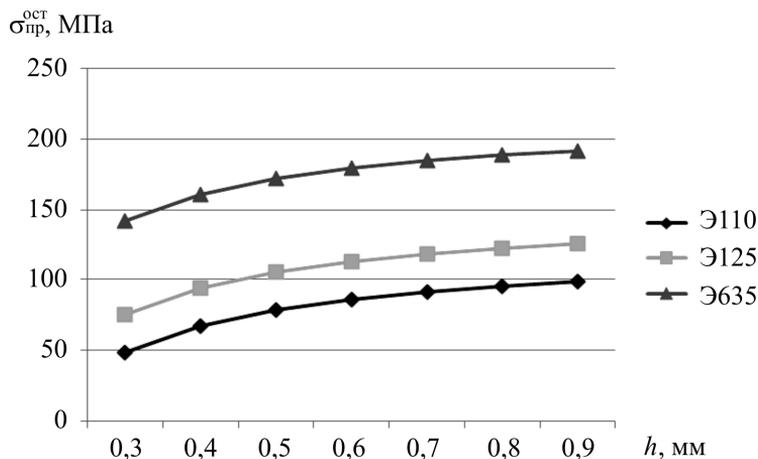


Рис. 3. Предельные уровни окружных остаточных напряжений в зависимости от толщины стенки оболочки из циркониевых сплавов Э110, Э125, Э635

Уровень допустимых эксплуатационных давлений  $P_{\text{экс}}$  показан на рис. 4 в зависимости от толщины стенки для различных радиусов срединной поверхности оболочки ТВЭЛов из сплава Э125 при наличии максимальных остаточных окружных напряжений 220 МПа.

Из рис. 4 видно, что оболочки с меньшим радиусом срединной поверхности прочнее, т.е. выдерживают максимальные уровни внутренних давлений.

Таким образом, в данной работе рассмотрены виды и процессы производства оболочек ТВЭЛов, применяемых в ядерных реакторах, с целью оценки уровня технологических остаточных напряжений с учетом физико-механических свойств циркониевых сплавов. Найдены предельно допустимые уровни внутренних давлений в оболочках. В предположении, что остаточные напряжения после прокатки правки и окончательной термообработки имеют уровень ниже предела упругости циркониевого сплава и могут быть учтены в расчетах по принципу суперпозиции совместно с эксплуатационными, определены предельные рабочие режимы с учетом влияния геометрии трубной заготовки и механических свойств циркониевого сплава. Разработана методика расчета предельно допустимых напряжений в зависимости от уровня окружных

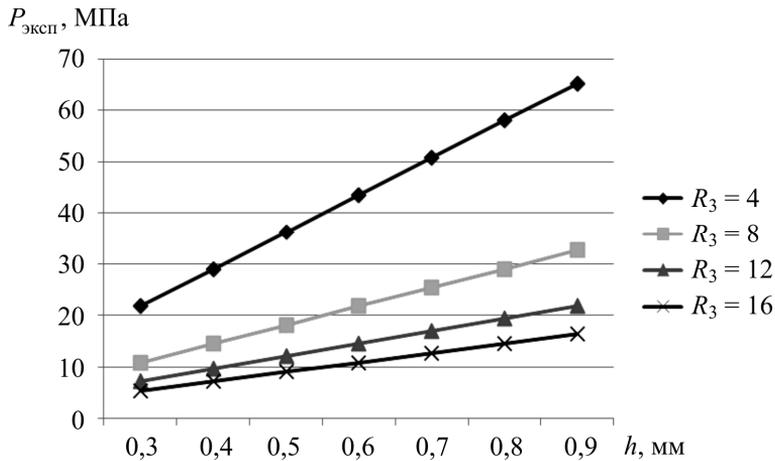


Рис. 4. Уровень допустимых эксплуатационных давлений  $P_{\text{эксп}}$  в зависимости от толщины стенки для различных радиусов срединной поверхности оболочки ТВЭЛов из сплава Э125 при наличии максимальных остаточных окружных напряжений 220 МПа

остаточных напряжений для различных сплавов циркония в случае, когда уровни остаточных напряжений известны. Определены предельные уровни окружных остаточных напряжений в зависимости от толщины стенки оболочки из различных циркониевых сплавов. Результаты расчета показали, что уровень максимальных эксплуатационных напряжений высок и сопоставим с пределами прочности для циркониевых сплавов, а значит, в эксплуатационных режимах необходимо контролировать уровень остаточных напряжений, так как может быть достигнут условный предел прочности и наступит разрушение, что недопустимо для таких прецизионных деталей, как ТВЭЛы.

### Список литературы

1. Поведение циркониевых оболочечных труб ТВЭЛов атомных реакторов в экстремальных эксплуатационных условиях / С.А. Никулин, В.Г. Ханжин, Д.Б. Рожнов, В.А. Белов // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2009. – № 5. – С. 32–39.
2. Никулин С.А, Рожнов А.Б. Коррозионное растрескивание циркониевых оболочечных труб (обзор): методы исследования и механизмы разрушения // *Металловедение и термическая обработка металлов.* – 2005. – № 2. – С. 31–39.

3. Соколов И.А., Уральский В.И. Остаточные напряжения и качество металлопродукции. – М.: Metallurgiya, 1981. – 96 с.

4. Кузнецова Е.В., Арташева А.А. Влияние эксплуатационных режимов и технологических остаточных напряжений на коррозионное растрескивание циркониевых оболочек, используемых в атомной энергетике // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2012. – № 1. – С. 51–61.

5. Тимошенко С.П., Войновский-Кригер С. Пластинки и оболочки. – М.: Наука, 1966. – 635 с.

6. Займовский А.С., Никулина А.В., Решетников Н.Г. Циркониевые сплавы в атомной энергетике. – М.: Энергоиздат, 1981. – 232 с.

7. Меерсона Г.А. Metallurgiya tsirkonija. – М.: Изд-во иностр. лит., 1959.

8. Пластическая деформация металлов и сплавов / Г.В. Филимонов, В.Н. Касатиков, Б.В. Кучеряев [и др.] // Науч. тр. МИСиС. – 1979. – № 118. – С. 27–31.

9. Шевакин Ю.Ф. Калибровка и усилия при холодной прокатке труб. – М.: Metallurgizdat, 1963. – 235 с.

10. Термическая и термомеханическая обработка сплавов циркония / Г.А. Некрасова, Б.Г. Парфенов, А.С. Пиляев [и др.]. – М., 1981. – 64 с.

### References

1. Nikulin S.A., Khanzhin V.G., Rozhnov D.B., Belov V.A. Povedenie tsirkonievyykh obolochechnyykh trub teplovydeliaiushchikh elementov atomnykh reaktorov v ekstremal'nykh ekspluatatsionnykh usloviyakh [Behavior of atomic reactor zirconium cladding fuel rod tubes under extreme operating conditions]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2009, no. 5, pp. 32-39.

2. Nikulin S.A., Rozhnov A.B. Korrozionnoe rastreskivanie tsirkonievyykh obolochechnyykh trub (obzor): metody issledovaniia i mekhanizmy razrusheniia [Corrosive spalling of zirconia obolochechenyyh pipes]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2005, no. 2, pp. 31-39.

3. Sokolov I.A., Ural'skii V.I. Ostatochnye napriazheniia i kachestvo metalloproduksii [Residual stress and quality of metal products]. Moscow: Metallurgiya, 1981. 96 p.

4. Kuznetsova E.V., Artasheva A.A. Vliianie ekspluatatsionnykh rezhimov i tekhnologicheskikh ostatochnyykh napriazhenii na korrozionnoe

rastreskivanie tsirkonievyykh obolochek, ispol'zuemykh v atomnoi energetike [The influence of operational modes and technological residual stresses on corrosion cracking of zirconium covers are used in atomic engineering]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*, 2012, no. 1, pp. 51-61.

5. Timoshenko S.P., Voinovskii-Kriger S. *Plastinki i obolochki* [Theory of plates and shells]. Moscow: Nauka, 1966. 635 p.

6. Zaimovskii A.S., Nikulina A.V., Reshetnikov N.G. *Tsirkonievye splavy v atomnoi energetike* [Zirconium alloys in the atomic industry]. Moscow: Energoizdat, 1981. 232 p.

7. Meersona G.A. *Metallurgiya tsirkoniia* [Metallurgy of zirconium]. Moscow: Izdatel'stvo inostrannoi literatury, 1959.

8. Filimonov G.V., Kasatkov V.N., Kucheriaev B.V. [et al.]. *Plasticheskaia deformatsiia metallov i splavov* [Plastic deformation of metals and alloys]. *Nauchnye trudy MISiS*, 1979, no. 118, pp. 27-31.

9. Shevakin Iu.F. *Kalibrovka i usiliia pri kholodnoi prokatke trub* [The calibration and efforts for cold-rolling tube]. Moscow: Metallurgizdat, 1963. 235 p.

10. Nekrasova G.A., Parfenov B.G., Piliaev A.S. [et al.]. *Termicheskaia i termomekhanicheskaiia obrabotka splavov tsirkoniia* [Thermal and thermomechanical processing of zirconium alloys]. Moscow, 1981. 64 p.

Получено 16.08.2016

### **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).

**Мелехин Дмитрий Анатольевич** (Пермь, Россия) – инженер-конструктор, магистрант кафедры «Динамика и прочность машин», Пермский национальный исследовательский политехнический университет.

**Елистратова Екатерина Сереевна** – студентка, факультет прикладной математики и механики, Пермский национальный исследовательский политехнический университет (614990, г. Пермь, Комсомольский пр., 29, e-mail: dpm@pstu.ru).

**Виндокуров Денис Владимирович** – студент, факультет прикладной математики и механики, 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 Engineering, Associate Professor, Department of Dynamics and Strength of Machines, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: mellen75@mail.ru).

**Dmitrii A. Melekhin** (Perm, Russian Federation) – Designer, Master Student, Department of Dynamic and Strength of Machines, Perm National Research Polytechnic University.

**Ekaterina S. Elistratova** – Student, Applied Mathematics and Mechanics Faculty, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: dpm@pstu.ru).

**Denis V. Vindokurov** – Student, Applied Mathematics and Mechanics Faculty, Perm National Research Polytechnic University (29, Komsomolsky av., Perm, 614990, Russian Federation, e-mail: dpm@pstu.ru).