

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ДЕФОРМАЦИИ ПО ТОЛЩИНЕ ШИРОКОГО БРУСА ПРИ ЦИКЛИЧЕСКОМ ПЛАСТИЧЕСКОМ ИЗГИБЕ

Максимов А.Б., к.т.н., доцент (aleksandrms@yandex.ru)

Гуляев М.В., к.воен.н., доцент кафедры информатики и прикладной математики

ФГБОУ «Государственный морской технологический университет»
(298309, Россия, Республика Крым, Керчь, ул. Орджоникидзе, 82)

Аннотация. Рассмотрено распределение деформации по толщине широкого бруса при циклическом изгибе с амплитудой деформации 15 и 5 %. Установлено, что вследствие смещения нейтральной линии деформации в сторону сжатых волокон деформация на растянутой стороне больше, чем на сжатой. Смещение нейтральной линии деформации объяснено тем, что сопротивление деформации сжатия больше, чем сопротивление растяжения. С увеличением числа циклов изгиба деформация на растянутой стороне возрастает, а на сжатой уменьшается. Вследствие отмеченных закономерностей при циклическом изгибе в центральной части бруса возникает слой с накоплением деформации растяжения. Ширина этого слоя с увеличением числа циклов изгиба до разрушения возрастает, приближаясь к толщине бруса.

Ключевые слова: широкий брус, циклический изгиб, амплитуда деформации, сжатие, растяжение, нейтральная линия деформации, сталь.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-7-486-490

При упругом чистом или поперечном изгибе прямого бруса нейтральная линия деформации совпадает с геометрически средней линией сечения бруса [1]. Деформация по сечению бруса имеет линейный характер симметрично относительно нейтральной линии деформации. Нормальные напряжения по толщине бруса распределены симметрично относительно нейтральной линии по степенной функции. При расчете на прочность кривого бруса (предварительно изогнутого) большой кривизны учитывается смещение нейтральной линии деформации. Нормальные напряжения по толщине образца в этом случае распределены по гиперболическому закону. Нейтральная линия деформации смещается в сторону сжатых волокон. Однако в работе [2] показано, что смещение нейтральной линии происходит и для прямого бруса малой кривизны. Авторы данной работы исследовали особенности пластического изгиба стального широкого бруса. Экспериментально установлено смещение нейтральной линии деформации при изгибе в сторону сжатых волокон. При циклическом изгибе по симметричному циклу и жесткой схеме нагружения вследствие смещения нейтральной линии по обе стороны относительно геометрически средней линии образуется слой металла некоторой толщины с накоплением остаточной деформации растяжения. Смещение нейтральной линии деформации в сторону сжатых волокон объяснено тем, что сопротивление сжатию больше, чем сопротивление растяжению. Наличие остаточной деформации растяжения свидетельствует о растяжении образца. Таким образом, циклическое деформирование при чистом изгибе по жесткой схеме нагружения приводит к увеличению длины образца.

В частности, в работе [3] исследовано изменение поперечной деформации сталей 10ХСНД и 17Г1С при циклическом растяжении – сжатии с амплитудой деформации 2 и 5 % по жесткой схеме нагружения в продольном направлении. Показано, что с увеличением амплитуды деформации и числа циклов деформирования происходит накопление остаточной деформации сжатия в поперечном направлении.

При циклическом кручении цельных цилиндрических образцов кругового сечения с амплитудой угла закручивания в интервале 180 – 720° происходит удлинение образцов с уменьшением их диаметра [4], причем при одностороннем кручении накопление остаточной деформации в продольном направлении больше, чем при циклическом.

Эффект увеличения длины стержня при кручении и уменьшения толщины образца при изгибе был обнаружен Пойнтингом более 100 лет назад. Величина эффекта Пойнтинга может быть рассчитана, используя методы нелинейной механики [5 – 12]. Однако однозначного физического толкования механизма этих эффектов, часто называемых эффектами второго порядка при растяжении, сжатии, кручении и изгибе, в физической теории пластичности не существует.

Эффекты второго порядка имеют практическое применение [13]. Поэтому накопление фактического материала по эффектам второго порядка представляет научный и практический интерес.

Целью данной работы было исследование распределения деформации по толщине широкого бруса при циклическом пластическом изгибе.

В качестве материала исследования использовали листовую прокат толщиной 5 мм из стали СтЗсп в нормализованном состоянии. Из листов в направлении

прокатки вырезали образцы размером $5 \times 15 \times 300$ мм. На боковую поверхность образца по толщине наносили микротвердометром ПМТ-3 два параллельных ряда отпечатков с шагом 0,2 мм [1].

Образцы деформировали по схеме чистого изгиба по симметричному циклу в условиях жесткой схемы нагружения с амплитудой деформации 15 и 5 %. Отношение ширины образца к толщине составляло не менее трех, что соответствовало напряженно-деформированному состоянию широкого бруса.

Величину амплитуды деформации (ε_a) при изгибе вычисляли по формуле

$$\varepsilon_a = \frac{h}{2R} \cdot 100 \%, \quad (1)$$

где h – толщина бруса, м; R – радиус изгиба, м.

Расстояние между отпечатками измеряли в исходном состоянии и после каждого этапа деформирования с определением степени относительной деформации по толщине бруса.

Изгиб бруса с амплитудой $\varepsilon_a = 15$ % соответствовал изгибу большой кривизны, так как $h/R = 0,3$, т. е. больше 0,2; а с амплитудой $\varepsilon_a = 5$ % – малой кривизны, так как $h/R = 0,1$, т. е. меньше 0,2.

На рис. 1, *а* представлена эпюра деформации поверхностного слоя на одной стороне бруса (первоначально сжатая сторона) через каждую четверть изгиба, а на рис. 1, *б* соответственно для противоположной стороны при расчетной амплитуде деформации 15 %. Видно, что деформация растяжения в поверхностном слое на одной стороне бруса всегда больше, чем деформация сжатия на противоположной. Для каждой стороны бруса деформация растянутых поверхностных волокон больше последующей деформации сжатия (по абсолютной величине). При этом абсолютная полусумма деформаций растяжения и сжатия на противоположных сторонах бруса при разных числах изгиба равна расчетной амплитуде деформации.

В промежуточном слое на расстоянии, равном $h/4$ от каждой поверхности бруса (рис. 1, *в*), отмеченные выше закономерности изменения деформации сохраняются, причем уже после третьего цикла деформирования промежуточный слой как по одну сторону от геометрически средней линии, так и по другую испытывает только деформацию растяжения. Это означает, что смещение нейтральной линии больше, чем $h/4$.

Геометрически средняя линия в процессе всего деформирования (рис. 1, *г*) подвергается циклическому растяжению по отнулевому циклу с возрастающей амплитудой деформации до 10,8 %.

Качественно аналогичные зависимости наблюдаются при амплитуде деформации 5 % (рис. 2). Центральная часть образца (геометрически средняя линия) деформируется растяжением по отнулевому циклу с возрастанием амплитуды деформации до 1,4 %.

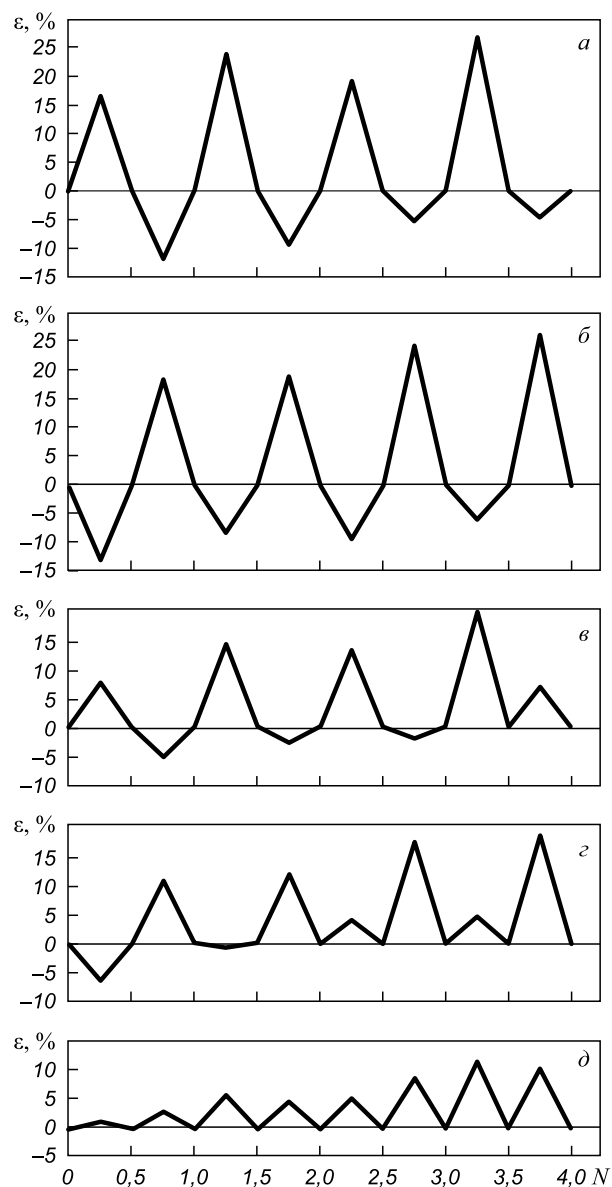


Рис. 1. Эпюры деформации бруса при изгибе с амплитудой 15 % в зависимости от числа циклов:

а – поверхность одной стороны бруса; *б* – поверхность противоположной стороны бруса; *в* – промежуточный слой с одной стороны бруса; *г* – промежуточный слой с противоположной стороны бруса

Fig. 1. Diagrams of the balk flexural deformation with an amplitude of 15 %, depending on the number of cycles:

a – the surface of one side of the balk; *b* – the surface of the opposite side of the balk; *v* – an intermediate layer on the one side of the balk; *z* – the intermediate layer from the opposite side of the balk

В работе [2] слой, в котором накапливается деформация, назван асимметричным.

Тот факт, что геометрически средняя линия в процессе всего деформирования подвергается циклическому растяжению, свидетельствует, что уже при первой четверти изгиба первого цикла происходит смещение нейтральной линии деформации в сторону сжатых волокон. Возрастание амплитуды деформации геометрически среднего слоя связано с прогрессивным смещением нейтральной линии. Смещение нейтральной

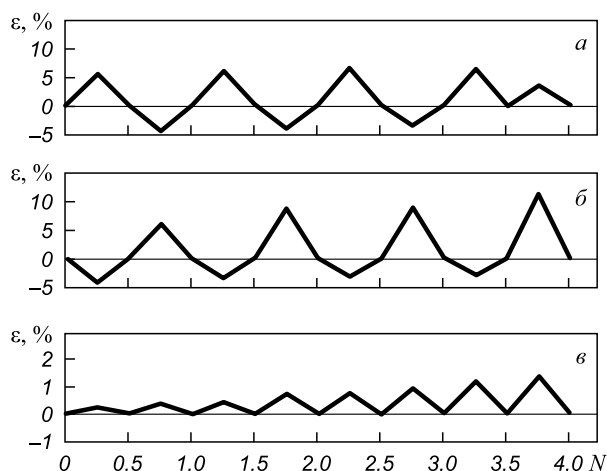


Рис. 2. Эпюры деформации бруса при изгибе с амплитудой 5 % в зависимости от числа циклов:

a – поверхность одной стороны бруса; *б* – поверхность противоположной стороны бруса; *в* – центральный слой бруса

Fig. 2. Diagrams of the balk flexural deformation with an amplitude of 5 % depending on the number of cycles:

a – the surface of one side of the balk; *б* – the surface of the opposite side of the balk; *в* – the central layer of the balk

линии в сторону сжатых волокон обусловлено, по-видимому, тем, что сопротивление сжатия больше, чем сопротивление растяжения.

С увеличением числа циклов изгиба (рис. 3) отношение сопротивления сжатия σ_c к сопротивлению растяжения σ_p возрастает, достигая максимального значения (2,0 – 2,1) при разрушении для обеих амплитуд деформации (при $\epsilon_a = 15$ % число циклов до разрушения составляет 4 – 5, а при $\epsilon_a = 5$ % – 26 – 28).

Из условия равновесия растянутой и сжатой областей изогнутого бруса следует отношение

$$\frac{\sigma_c}{\sigma_p} = \frac{h/2 + n}{h/2 - n}, \quad (2)$$

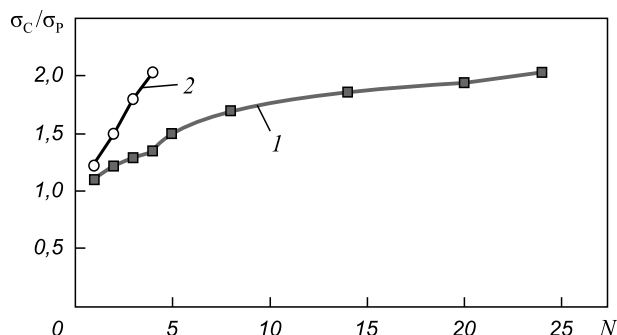


Рис. 3. Изменение ширины смещения нейтральной линии деформации в зависимости от соотношения сопротивления сжатия к сопротивлению растяжения при амплитуде деформации, %:
1 – 5; 2 – 15

Fig. 3. Change in the width of the deformation displacement of the neutral line, depending on the ratio of resistance to compression and resistance to stretching at strain amplitude, %:
1 – 5; 2 – 15

где h – ширина асимметричного слоя для заданного числа циклов изгиба, м.

На рис. 4 представлено изменение ширины асимметричного слоя в зависимости от соотношения сопротивления сжатия к сопротивлению растяжения.

Характерно, что данные при деформировании с амплитудой деформации 15 и 5 % расположены на одной кривой, т. е. описываются одним законом. Возможно, это обусловлено качественно одинаковыми механизмами протекания процессов деформации, при этом параметры деформирования (амплитуда деформации и число циклов изгиба) влияют на полноту и скорость протекания процессов.

Проведенные эксперименты показали, что при изгибе бруса с большой и малой кривизной происходит смещение нейтральной линии деформации в сторону сжатых волокон, которое увеличивается с возрастанием числа циклов изгиба, достигая 36 % толщины бруса.

Учитывая, что смещение нейтральной линии происходит по обе стороны от геометрически средней линии, максимальная ширина слоя, где накапливается остаточная деформация растяжения, составляет 3,6 мм при толщине бруса 5 мм, причем это не зависит от амплитуды деформирования. Максимальная остаточная деформация при $\epsilon_a = 15$ % достигает 20 %, а при $\epsilon_a = 5$ – 4 % [2].

Необходимо отметить, что распределение деформации по толщине бруса имеет линейный характер, одинаковый для растянутой и сжатой частей. При изгибе сечение бруса поворачивается относительно нейтральной линии деформации, оставаясь плоским, т. е. гипотеза плоских сечений справедлива и для изгиба с большой кривизной. Например, при амплитуде деформации 15 %, поворот сечения за первые четыре цикла составил 24 – 30°, а разброс значений находился в пределах ошибки измерения.

Определяющим фактором в характере распределения деформации по толщине бруса является величина значе-

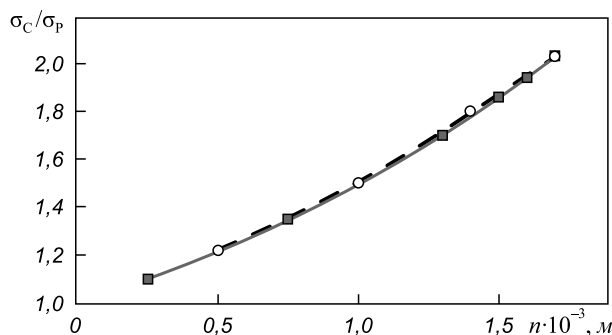


Рис. 4. Изменение ширины асимметричного слоя в зависимости от соотношения сопротивления сжатия к сопротивлению растяжения при амплитуде деформации, %:
■ – 5 (сплошная линия); ○ – 15 (пунктирная линия)

Fig. 4. Change of the width of the asymmetric layers, depending on the ratio of the resistance of steel to compression to resistance of steel to tension at strain amplitude, %:
■ – 5 (solid line); ○ – 15 (dotted line)

ния соотношения сопротивления сжатию и сопротивлению растяжению. Сопротивление деформации для стали определяется структурой, температурой, скоростью деформирования и схемой напряженно-деформированного состояния. В данной работе исследовалась сталь СтЗсп с феррито-перлитной структурой при комнатной температуре деформирования с частотой изгиба 0,07 цикла/с. Поэтому определяющим фактором, влияющим на сопротивление стали деформированию, в данном случае является схема напряженно-деформированного состояния.

Как известно, пластическая деформация может осуществляться двумя способами: скольжением и двойникованием [14]. Деформация двойникованием происходит в тех случаях, когда скольжение затруднено. Напряжение деформации сдвига при двойниковании больше, чем при скольжении [15]. По-видимому, в сжатой части бруса возникает такое напряженное состояние, при котором реализуется пластическое течение двойникованием.

Выводы. На основании проведенных исследований установлено, что при пластическом изгибе происходит смещение нейтральной линии деформации в сторону сжатых волокон. С увеличением амплитуды деформирования до разрушения смещение нейтральной линии возрастает, приближаясь к толщине бруса.

Вследствие возрастания смещения нейтральной линии деформации с увеличением числа циклов изгиба, деформация на растянутой поверхности возрастает, а на сжатой – уменьшается.

Распределение деформации по толщине бруса при циклическом изгибе носит линейный характер, одинаковый для растянутой и сжатой частей бруса.

Периодическое смещение нейтральной линии деформации при циклическом изгибе бруса приводит к накоплению остаточной деформации растяжения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Феодосьев В.И. Сопротивление материалов: Учебник для вузов. – М.: МГТУ. 2000. – 592 с.

2. Подгайский М.С., Максимов А.Б., Наливайченко Т.М. Пластическое деформирование при циклическом знакопеременном изгибе // Физико-химическая механика материалов. 1983. № 1. С. 115 – 116.
3. Максимов А.Б. Исследования пластической деформации при циклическом растяжении – сжатии // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. 2010. № 1. С. 61 – 66.
4. Максимов А.Б. Исследование пластической деформации кручением стальных стержней // Новые материалы и технологии в металлургии и машиностроении. 2008. № 2. С. 133 – 136.
5. Калашников В.В. Карякин М.И. Эффекты второго порядка и принцип Сен-Венана в задачах кручения нелинейно-упругого стержня // Прикладная механика и техническая физика. 2006. Т. 47. № 6. С. 129 – 136.
6. Калашников В.В. Эффекты второго порядка в задачах растяжения, кручения и изгиба нелинейно-упругих тел: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук. – Ростов-на-Дону, 2006. – 21 с.
7. Зубов Л.М. Нелинейная теория изгиба и кручения упругих тел // Тр. III Всероссийской конф. по теории упругости с междунар. участием. – Ростов-на-Дону: изд-во Новая книга, 2004. С. 180 – 182.
8. Зеленина А.А., Зубов Л.Н. Нелинейная теория чистого изгиба призматических упругих тел // Прикладная математика и механика. 2000. Т. 64. № 3. С. 416 – 424.
9. Калашников В.В., Карякин М.И. Эффекты второго порядка в задаче плоского изгиба линейно-упругого стержня // Современные проблемы механики сплошной среды: Тр. X Междунар. конф. Т. 1. – Ростов-на-Дону: изд-во ЦВВР, 2006. С. 148 – 152.
10. Карякин М.И., Шубчинская Н.Ю. Влияние внутренних напряжений на изменения длины нелинейно-упругого цилиндра. // Тр. VII Всероссийской конф. по механике деформируемого твердого тела (Ростов-на-Дону, 15 – 18 октября 2013 г.). – Ростов-на-Дону: изд-во ЮФУ, 2013. Т. 1. С. 262 – 266.
11. Карякин М.И., Сухов Д.Ю., Шубчинская Н.Ю. Об устойчивости чистого изгиба упругой панели при больших деформациях // Экологический вестник научных центров ЧЭС. 2012 № 4. С. 69 – 75.
12. Карякин М.И. Об особенностях растяжения нелинейно-упругих образцов // Экологический вестник научных центров ЧЭС. 2007 № 4. С. 43 – 48.
13. А. с. 546456 СССР, МКИ2 В23Р11/02. Способ демонтажа пресованных соединений деталей типа вал-втулка / Коркин В.В.; опубл. 15.02.77. Бюл. № 6.
14. Регель В.Р., Слуцкер А.И., Томашевский Э.Е. Кинетическая природа прочности твердых тел – М.: Наука, 1974. – 560 с.
15. Хоникомб Р. Пластическая деформация металлов. – М.: Мир, 1972. – 406 с.

Поступила 5 февраля 2015 г.

IZVESTIYA VUZov. CHERNAYA METALLURGIYA = IZVESTIYA. FERROUS METALLURGY. 2015. Vol. 58. No. 7, pp. 486–490.

THE DEFORMATIONS OF DISTRIBUTION ACROSS THE THICKNESS OF A WIDE BALK UNDER CYCLIC PLASTIC BENDING

Maksimov A.B., Cand. Sci. (Eng.), Assist. Professor
(aleksandr.mks@yandex.ru)

Gulyaev M.V., Cand. Sci. (Military), Assist. Professor of the
Chair of Informatics and Applied Mathematics

Kerch State Marine Technical University (82, Ordzhonikidze str.,
Kerch, Crimea, 98300, Russia)

Abstract. This article examines the strain distribution across the thickness of a wide balk with bending cycle with an amplitude of deformation 15 and 5 %. It was found that as a consequence

of displacement of the neutral line deformation in the direction of compressed fibers distension on the stretched side is more than in compression side. The authors explain the displacement of the neutral line deformation by the fact that the resistance to compression deformation is stronger than to the stretching deformation. Deformation increases on a stretched side and decreases on the compressed side with the increase in the number of bending cycles. In consequence of the above regularities under cyclic bending in the central part of the balk there is a layer with the accumulation of tensile strain. The width of the layer increases with the number of bending cycles to failure approaching to the thickness of the balk.

Keywords: wide balk, cyclic plastic bending, amplitude of deformation, compression, stretching, neutral line, deformation, steel.

DOI: 10.17073/0368-0797-2015-7-486-490

REFERENCES

1. Feodos'ev V.I. *Soprotivlenie materialov: uchebnik dlya vuzov* [Strength of materials: a textbook for universities]. Moscow: MGTU. 2000. 592 p. (In Russ.).
2. Podgaiskii M.S., Maksimov A.B., Nalivaichenko T.M. Plastic deformation under cyclic alternating bending. *Fiziko-khimicheskaya mekhanika materialov*. 1983, no. 1, pp. 115–116. (In Russ.).
3. Maksimov A.B. The research of plastic deformation under cyclic tension – compression. *Novye materialy i tekhnologii v metallurgii i mashinostroenii*. 2010, no. 1, pp. 61–66. (In Russ.).
4. Maksimov A.B. The research of plastic deformation under torsion of steel bars. *Novye materialy i tekhnologii v metallurgii i mashinostroenii*. 2008, no. 2, pp. 133–136. (In Russ.).
5. Kalashnikov V.V., Karyakin M.I. Second-order effects and Saint Venant's principle in the torsion problem of a nonlinear elastic rod. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*. 2006. Vol. 47, no. 6, pp. 879–885.
6. Kalashnikov V.V. *Effekty vtorogo poryadka v zadachakh rastyazheniya, krucheniya i izgiba nelineino-uprugikh tel: Avtoref. dis. kand. fiz.mat.nauk* [Second-order effects in the problems of stretching, twisting and bending of nonlinear elastic bodies: Cand. Phys.-Math. Sci. Diss.]. Rostov-on-Don, 2006. 21 p. (In Russ.).
7. Zubov L.M. *Nelineinaya teoriya izgiba i krucheniya uprugikh tel* [Nonlinear theory of bending and torsion of elastic bodies]. In: *Trudy III Vserossiiskoi konferentsii po teorii uprugosti s mezhdunarodnym uchastiem* [Proceedings of the 3rd All-Russian conference on the theory of elasticity with international participation]. Rostov-on-Don. Izd-vo: Novaya kniga, 2004, pp. 180–182. (In Russ.).
8. Zelenina A.A., Zubov L.N. The non-linear theory of the pure bending of prismatic elastic solids. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 2000. Vol. 64, no. 3, pp. 399–406.
9. Kalashnikov V.V., Karyakin M.I. *Effekty vtorogo poryadka v zadache ploskogo izgiba lineino-uprugogo sterzhnya* [Second-order effects in the problem of plane bending of linearly-elastic rod]. In: *Sovremennye problemy mekhaniki sploshnoi sredy. Trudy X Mezhdunarodnoi konferentsii* [Modern problems of continuum mechanics. Proceedings of the 10th International Conference]. Vol. 1. Rostov-on-Don. Izd-vo "TsVVR", 2006, pp. 148–152. (In Russ.).
10. Karyakin M.I., Shubchinskaya N.Yu. *Vliyanie vnutrennikh napryazhenii na izmeneniya dliny nelineinogo – uprugogo tsilindra* [The influence of internal stresses on the changes in the length of the nonlinear – elastic cylinder]. In: *Trudy VII Vserossiiskoi konferentsii po mekhanike deformiruemogo tverdogo tela. g. Rostov-on-Don, 15 – 18 oktyabrya 2013* [Proceedings of the 7th All-Russian Conference on mechanics of deformation of solids]. Rostov-on-Don, Izd-vo YuFU. 2013. Vol. 1, pp. 262–266. (In Russ.).
11. Karyakin M.I., Sukhov D.Yu., Shubchinskaya N.Yu. The stability of pure bending of elastic panels under large deformations. *Ekologicheskii vestnik nauchnykh tsentrov ChES*. 2012, no. 4, pp. 69–75. (In Russ.).
12. Karyakin M.I. The peculiarities of strain of nonlinear elastic samples. *Ekologicheskii vestnik nauchnykh tsentrov ChES*. 2007, no. 4, pp. 43–48. (In Russ.).
13. Korkin V.V. *Sposob demontazha pressovannykh soedinenii detalei tipa val-vtulka* [A method of dismantling of pressed parts such as axis-liner]. Certificate of authorship USSR no. 546456. *Byulleten' izobretenii*. 1977, no. 6. (In Russ.).
14. Regel' V.R., Slutsker A.I., Tomashevskii E.E. *Kineticheskaya priroda prochnosti tverdykh tel* [The kinetic nature of the strength of solids]. Moscow: Nauka. 1974, 560 p. (In Russ.).
15. Honeycombe R.W.K. *The plastic deformation of metals*. Edward Arnold Ltd., 2nd ed. 1984, 483 p. (Russ.ed.: Honeycombe R. *Plasticheskaya deformatsiya metallov*. Moscow: Mir, 1972. 408 p.).

Received February 5, 2015