

УДК 539.3, 620.171.2

АНАЛИЗ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ РАСТЯЖЕНИЯ УПРУГОПЛАСТИЧЕСКИХ ОБРАЗЦОВ И ОБРАЗОВАНИЯ ШЕЙКИ С УЧЕТОМ КРАЕВЫХ ЭФФЕКТОВ

В. Г. Баженов, С. Л. Осетров, Д. Л. Осетров

Научно-исследовательский институт механики Национального исследовательского
Нижегородского государственного университета им. Н. И. Лобачевского,
603950 Нижний Новгород, Россия
E-mails: Vazhenov@mech.unn.ru, osetrop@mail.ru, osetrovdmitry@mail.ru

Исследуются большие деформации упругопластических цилиндрических стержней и оболочек различной толщины при растяжении. Оценивается влияние геометрии образцов и зависимости напряжений от деформаций при одноосном растяжении на краевые эффекты и процесс формообразования шейки. Анализируется применимость критерия Консидера для определения момента потери устойчивости пластического деформирования при растяжении. В результате вычислительных экспериментов подтверждено, что в качестве параметра подобия процессов неравномерного деформирования образцов при растяжении можно использовать отношение тангенса угла наклона истинной диаграммы деформирования к интенсивности напряжений.

Ключевые слова: экспериментально-расчетный метод, краевой эффект, критерий Консидера, потеря устойчивости пластического деформирования, локализация деформаций, шейка, параметр подобия.

DOI: 10.15372/PMTF20180416

Наиболее распространенным способом изучения свойств упругопластических материалов являются эксперименты на растяжение цилиндрических стержней и оболочек. В работе [1] отмечается, что предположение о равномерном удлинении рабочей части образца приводит к большим погрешностям при расчете напряженно-деформированного состояния вследствие значительной неоднородности изменения напряжений (до 20 %) и деформаций (до 40 %) в поперечном сечении. При растяжении напряженно-деформированное состояние вблизи головок образца является трехосным, участки вблизи краев образца растягиваются в меньшей степени, чем участки, расположенные в его середине [2]. Вследствие этого имеет место нелинейный краевой эффект изменения толщины рабочей части образца, размер зоны краевого эффекта зависит от степени деформации. Закономерности образования и распространения краевых эффектов изучены недостаточно, поэтому при проведении исследований их влияние на результаты минимизируется путем увеличения рабочей части образцов.

Помимо нелинейного краевого эффекта в образцах при растяжении имеют место неоднородность и неоднородность напряженно-деформированного состояния, что приводит к ло-

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (код проекта 15-19-10039).

© Баженов В. Г., Осетров С. Л., Осетров Д. Л., 2018

кализации процесса деформирования. Условие максимальной нагрузки в качестве критерия момента потери устойчивости пластического деформирования ввел А. Консидер [3–9]. Согласно этому критерию критическую деформацию при растяжении можно определить из условия

$$K = 1, \quad (1)$$

где

$$K = \frac{1}{\sigma_i} \frac{d\sigma_i}{de_i}, \quad (2)$$

σ_i — интенсивность истинных напряжений; e_i — интенсивность логарифмических деформаций.

В работах [10, 11] отмечается, что момент достижения максимального значения нагрузки и момент локализации пластического деформирования могут не совпадать. На условной диаграмме растяжения образца возможно образование горизонтального участка. При деформации, соответствующей началу этого участка, появляется шейка, при достижении деформации, соответствующей его концу, происходит интенсивное развитие шейки [6, 8, 9]. Согласно данным различных работ шейка начинает развиваться в момент достижения нагрузки максимума [12], до момента достижения максимума [13] или после момента его достижения [14].

Деформации в шейке локализуются в малой зоне вблизи минимального поперечного сечения, ограниченной точками перегиба профиля шейки [8, 9, 15, 16]. Теоретический анализ процесса формообразования шеек и сравнение его результатов с экспериментальными данными выполнены в работах [4, 8, 9, 16, 17]. В [18, 19] приводятся результаты численных и экспериментальных исследований области образования шейки при растяжении цилиндрических образцов, в [20] — результаты экспериментальных исследований влияния начальной длины образцов на процесс локализации деформаций в виде шейки. В указанных выше работах исследования проводились на основе упрощенных моделей поведения материалов, в которых не учитывалось влияние краевых эффектов.

При проведении исследований процесса деформирования при больших деформациях целесообразно использовать разработанный авторами данной работы экспериментально-расчетный метод [21–28], позволяющий учесть неоднородность напряженно-деформированного состояния.

Численное моделирование задач о квазистатическом растяжении образцов осуществлялось в динамической осесимметричной постановке с использованием пакетов прикладных программ “Динамика-2” [29] и ANSYS/LS-DYNA. Рассматривались следующие образцы: цилиндрический сплошной стержень и цилиндрические оболочки толщиной $R_0/h_0 = 4,5$ (“тонкая” оболочка) и $R_0/h_0 = 1,5$ (“толстая” оболочка). Здесь R_0 — начальный радиус; h_0 — начальная толщина оболочки. Начальная длина рабочей части образцов равна $3d_0$, $5d_0$ и $8d_0$ (d_0 — начальный диаметр рабочей части образцов). Скорость перемещения на торцах образцов задавалась таким образом, чтобы динамические эффекты были пренебрежимо малы [30].

На рис. 1 приведены используемые при расчетах истинные диаграммы деформирования и соответствующие им значения параметра K (2). Заметим, что кривая 1 соответствует построенной ранее диаграмме для стали марки 12X18H10T [23]. Кривые 2–4 построены для зависимостей $K(e_i) > K_{ст}(e_i)$, $K(e_i) = K_{ст}(e_i)$, $K(e_i) < K_{ст}(e_i)$ соответственно.

Результаты расчетов представлены на рис. 2–6 (Δe_i — разность значений интенсивности логарифмических деформаций в точках на внешней поверхности и в плоскости симметрии образца, s/d_0 — расстояние от границы рабочей части недеформированного

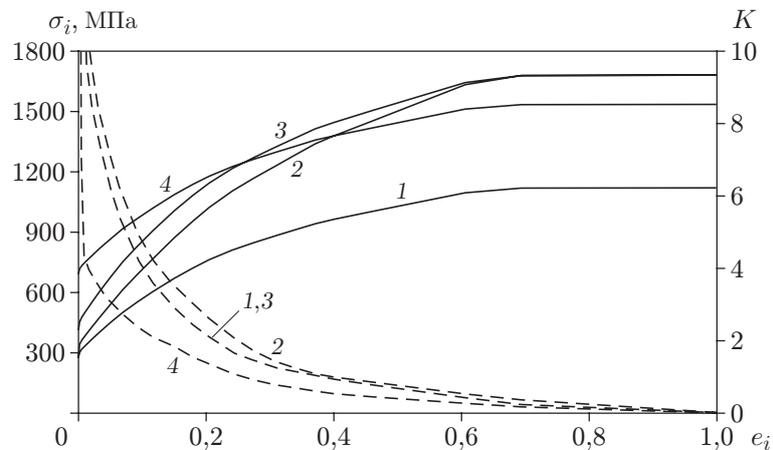


Рис. 1. Истинные диаграммы деформирования (сплошные линии) и зависимость $K(e_i)$ (штриховые линии):

1 — сталь марки 12X18H10T, 2 — $K(e_i) > K_{cr}(e_i)$, 3 — $K(e_i) = K_{cr}(e_i)$, 4 — $K(e_i) < K_{cr}(e_i)$

образца до плоскости симметрии образца, отнесенное к его диаметру, F — растягивающая сила, S_0 — начальная площадь рабочей части). Анализ рис. 2–6 позволяет сделать следующие выводы.

При наличии краевого эффекта интенсивность деформаций по мере приближения к границе рабочей части образцов уменьшается (см. рис. 2, 3). На кривых, приведенных на рис. 2, 3, имеется участок, на котором интенсивность деформаций увеличивается, а затем уменьшается вследствие возникновения зон частичной разгрузки. Распределение деформаций вдоль поверхности образцов имеет форму, близкую к форме конуса. Независимо от вида образцов и материала длина зоны краевого эффекта равна d_0 . При дальнейшем растяжении угол наклона конусов возрастает, но длина зоны краевого эффекта не увеличивается. При начальной длине образцов менее $2d_0$ зоны краевых эффектов смыкаются, т. е. в таких образцах зона равномерного деформирования отсутствует даже на начальном этапе нагружения. Вне зоны краевого эффекта имеется незначительная неравномерность распределения деформаций вдоль образцов.

Результаты расчетов, представленные на рис. 2, показывают, что в сплошных стержнях краевые эффекты проявляются в меньшей степени, чем в оболочках. При увеличении толщины оболочек влияние краевых эффектов уменьшается. Краевые эффекты в образцах существенно зависят от истинной диаграммы деформирования материала. При уменьшении параметра K неравномерность деформаций увеличивается (см. рис. 3). При различных истинных диаграммах деформирования, но одном и том же значении параметра K (кривые 1, 3 на рис. 1) зоны краевого эффекта распространяются одинаково.

Локализация процесса деформирования начинается в точках, где интенсивность деформаций достигает критического значения, определяемого критерием Консидера (1). Потеря устойчивости пластического деформирования происходит при деформациях, соответствующих концу горизонтального участка и началу падения напряжений на условной диаграмме деформирования. При численном моделировании шейка образуется в плоскости симметрии. В экспериментах шейка может образовываться в плоскостях, находящихся на различных расстояниях от границы рабочей части образца, что обусловлено несовершенством геометрии образцов, наличием краевых эффектов и неоднородностью упруго-пластических материалов. Шейка возникает в тех точках, где достигается максимальное значение интенсивности деформаций в объеме образца.

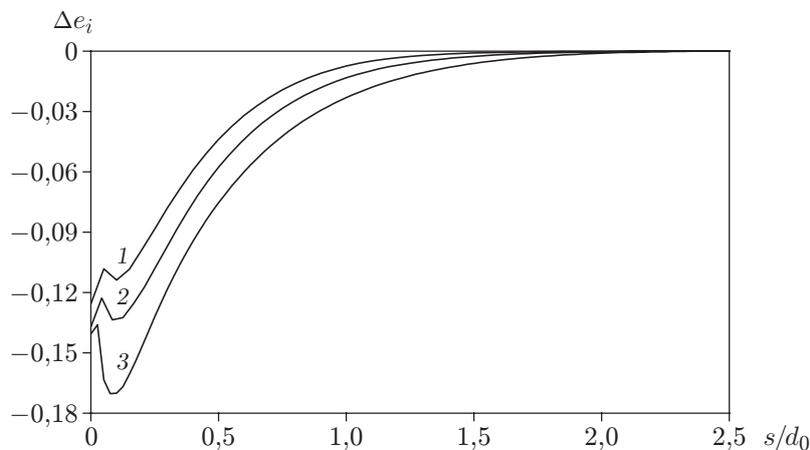


Рис. 2. Распределение деформации по длине цилиндрического стержня (1), “толстой” (2) и “тонкой” (3) цилиндрических оболочек, выполненных из стали марки 12X18H10T (начальная длина образца $5d_0$, $\Delta L/L_0 = 0,35$), при растяжении

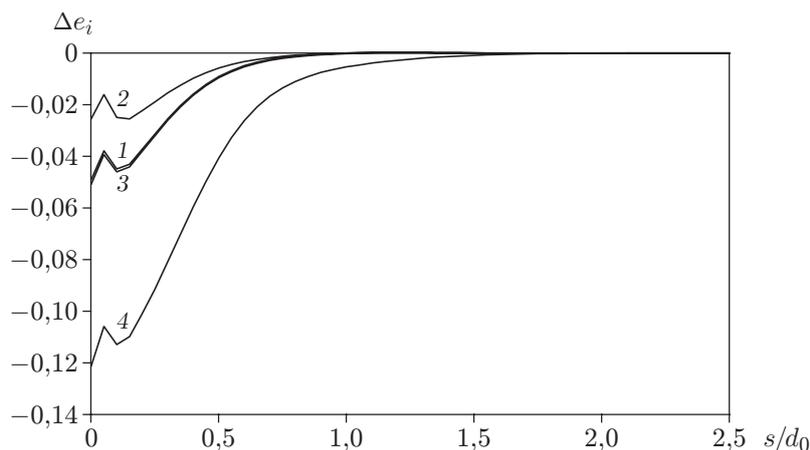


Рис. 3. Распределение деформации по длине сплошного цилиндрического стержня при растяжении (начальная длина образца $5d_0$, $\Delta L/L_0 = 0,224$):
1 — сталь марки 12X18H10T, 2 — $K(e_i) > K_{ст}(e_i)$, 3 — $K(e_i) = K_{ст}(e_i)$, 4 — $K(e_i) < K_{ст}(e_i)$

Увеличение зоны краевого эффекта приводит к увеличению скорости роста интенсивности деформаций в зоне равномерного напряженно-деформированного состояния, поэтому критическое значение K (1) достигается при меньших удлинениях образцов (см. рис. 4, 5). Таким образом, в оболочках шейки возникает при меньших удлинениях, чем в сплошных стержнях. Аналогичные результаты получены при меньшей толщине оболочки и длине рабочей части образцов.

Если значение параметра K для истинной диаграммы деформирования достаточно большое (больше, чем для кривых 1, 3 на рис. 1), то влияние краевых эффектов является незначительным. Уменьшение параметра K приводит к тому, что при растяжении происходит увеличение разности деформаций на границе и в плоскости симметрии, а также уменьшение интенсивности деформаций в области образования шейки (см. рис. 4).

При построении истинной диаграммы деформирования для образцов с начальной длиной более $3d_0$ краевыми эффектами можно пренебрегать до тех пор, пока не будет до-

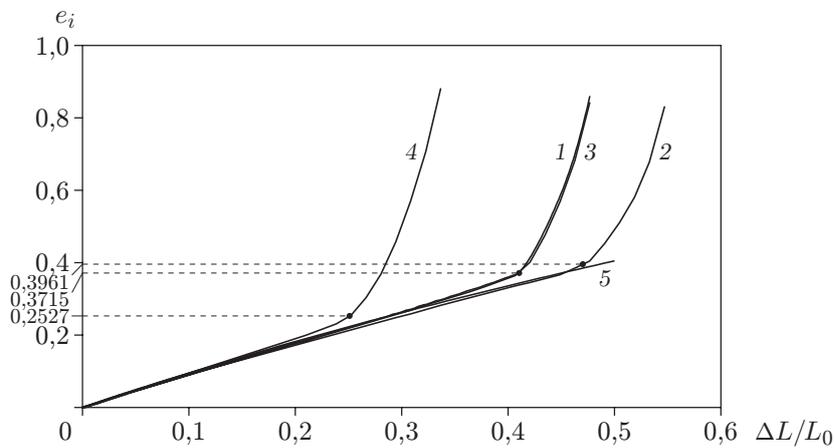


Рис. 4. Зависимость интенсивности логарифмической деформации в центре плоскости симметрии стержня e_i от условной деформации растяжения $\Delta L/L_0$ при различных диаграммах деформирования (начальная длина образца $5d_0$): 1 — сталь марки 12X18H10T, 2 — $K(e_i) > K_{CT}(e_i)$, 3 — $K(e_i) = K_{CT}(e_i)$, 4 — $K(e_i) < K_{CT}(e_i)$, 5 — зависимость $e_i(\Delta L/L_0)$ без учета краевых эффектов; ординаты точек — значения e_i , определенные по критерию Консидера (1)

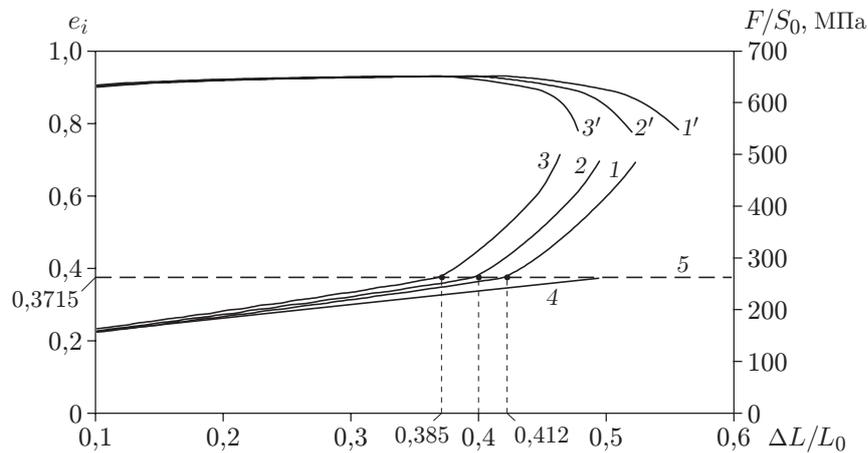


Рис. 5. Зависимости интенсивности логарифмической деформации e_i в центре плоскости симметрии (1–3) и условных напряжений F/S_0 (1'–3') от $\Delta L/L_0$ для стали марки 12X18H10T (начальная длина образца $5d_0$): 1, 1' — растяжение цилиндрического стержня, 2, 2' — растяжение “толстой” цилиндрической оболочки, 3, 3' — растяжение “тонкой” цилиндрической оболочки, 4 — зависимость $e_i(\Delta L/L_0)$ без учета краевых эффектов, 5 — значение e_i , определенное по критерию Консидера (1); абсциссы точек — значения $\Delta L/L_0$ в момент потери устойчивости, определенные по критерию Консидера (1)

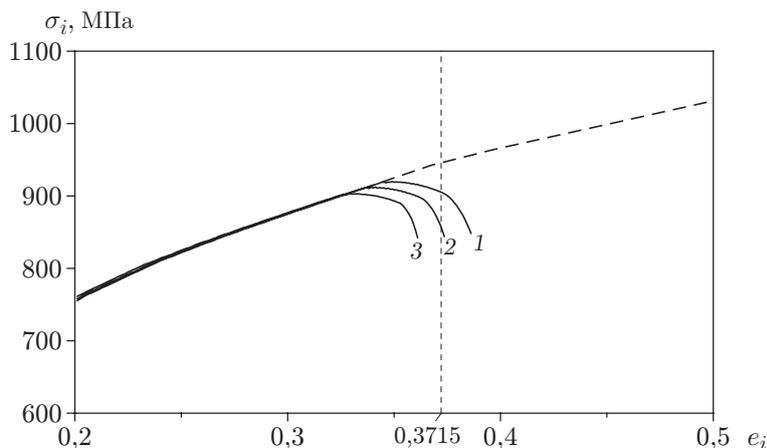


Рис. 6. Зависимость интенсивности напряжений от интенсивности деформаций: 1 — цилиндрический стержень, 2 — “толстая” цилиндрическая оболочка, 3 — “тонкая” цилиндрическая оболочка; штриховая линия — сталь марки 12Х18Н10Т

стигнут максимум на условной диаграмме деформирования. На рис. 6 приведена зависимость интенсивности напряжений $\sigma_i = (F/S_0)(1 + \Delta L/L_0)$ от интенсивности деформаций $e_i = \ln(1 + \Delta L/L_0)$. Интенсивность логарифмических деформаций, соответствующая максимуму на условной диаграмме деформирования, не совпадает со значением, определяемым по критерию Консидера (1), и отличие от него увеличивается по мере увеличения разности деформаций на границе и в плоскости симметрии при растяжении.

Проведен также численный анализ формы шейки в зависимости от начальной геометрии образцов и свойств материала. Максимальная длина зоны локализации деформаций составляет не более $2d_0$ и практически не зависит от начальной длины, площади поперечного сечения рассматриваемых образцов и диаграммы деформирования.

Для образцов с начальной длиной более $3d_0$ наименьший радиус и форма шейки практически не зависят от площади поперечного сечения и начальной длины образца. Таким образом, зная наименьший радиус стержня или оболочки, можно определить значение интенсивности деформаций в минимальном сечении шейки независимо от формы образца, так как в этом случае имеет место напряженно-деформированное состояние, близкое к одноосному.

Форма шейки зависит от истинной диаграммы деформирования материала. При уменьшении параметра K скорость уменьшения радиуса шейки увеличивается, процесс деформирования локализуется вблизи оси симметрии. При различных истинных диаграммах деформирования, но одном и том же значении параметра K шейки имеют одинаковую форму.

Таким образом, проведены численные исследования процессов растяжения упругопластических цилиндрических стержней и оболочек. Определены основные закономерности образования и распространения зон краевых эффектов, а также степень их влияния на процессы деформирования и образования шейки. Сделан вывод, что образование шейки происходит в области, где интенсивность деформаций достигает критического значения в соответствии с критерием Консидера (1). Определен параметр подобия процессов деформирования при растяжении упругопластических стержней и оболочек.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кайбышев О. Д.** Пластичность и сверхпластичность металлов. М.: Metallurgy, 1975.
2. **Пресняков А. А.** Очаг деформации при обработке металлов давлением. Алма-Ата: Наука, 1988.
3. **Давиденков Н. Н.** О природе шейки при растяжении образцов // Журн. техн. физики. 1955. Т. 25, вып. 5. С. 877–880.
4. **Shanly F. R.** Tensile instability (necking) of ductile materials // Aerospace Engng. 1961. V. 20, N 12. P. 55–61.
5. **Качанов Л. М.** Основы теории пластичности. М.: Наука, 1969.
6. **Людвик П.** Основы технологической механики // Расчеты на прочность. Машиностроение. 1971. Вып. 15. С. 130–168.
7. **Малинин Н. Н.** Прикладная теория пластичности и ползучести. М.: Машиностроение, 1975.
8. **Надаи А.** Пластичность и разрушение твердых тел. М.: Изд-во иностр. лит., 1954. Т. 1.
9. **Надаи А.** Пластичность и разрушение твердых тел. М.: Изд-во иностр. лит., 1969. Т. 2.
10. **Ковальчук Б. И.** К вопросу о потере устойчивости пластического деформирования оболочек // Пробл. прочности. 1983. № 5. С. 11–16.
11. **Колпак Е. П.** Устойчивость безмоментных оболочек при больших деформациях. СПб.: Изд-во С.-Петербург. гос. ун-та, 2000.
12. **Христенко И. Н., Пащенко А. А.** Условие образования шейки при растяжении стальных образцов // Изв. АН СССР. Металлы. 1987. № 6. С. 105–107.
13. **Шнейдерман А. Ш.** О распределении деформаций в шейке образца при растяжении // Завод. лаб. 1975. Т. 41, № 6. С. 728–730.
14. **Матюнин В. М.** Особенности перехода равномерной деформации в сосредоточенную // Тр. Моск. энергет. ин-та. 1976. Вып. 305. С. 76–78.
15. **Бриджмен П.** Исследования больших пластических деформаций и разрыва. М.: Изд-во иностр. лит., 1955.
16. **Kaplan M. A.** The stress and deformation in mild steel during axisymmetric necking // Trans. ASME. Ser. E. J. Appl. Mech. 1973. V. 40, iss. 1. P. 271–276.
17. **Одинг С. С.** Исследование процесса образования и развития шейки при растяжении цилиндрического образца // Пробл. прочности. 1983. № 10. С. 103–106.
18. **Осинцев А. В., Плотников А. С., Морозов Е. М., Лубкова Е. Ю.** К вопросу о месте образования шейки при растяжении цилиндрических образцов // Письма о материалах. 2017. Т. 7, № 3. С. 260–265.
19. **Бережной Д. В., Паймушин В. Н.** О двух постановках упругопластических задач и теоретическое определение места образования шейки в образцах при растяжении // Прикл. математика и механика. 2011. Т. 75, № 4. С. 635–659.
20. **Вильдеман В. Э., Ломакин Е. В., Третьякова Т. В., Третьяков М. П.** Закономерности развития неоднородных полей при закритическом деформировании стальных образцов в условиях растяжения // Изв. РАН. Механика твердого тела. 2016. № 5. С. 132–139.
21. **Пат. 2324162 РФ МПК G 01 N 3/00.** Способ определения деформационных и прочностных свойств материалов при больших деформациях и неоднородном напряженно-деформированном состоянии / В. Г. Баженов, С. В. Зефирова, Л. Н. Крамарев, С. Л. Осетров, Е. В. Павленкова. № 2006115805; Опубл. 10.05.2008, Бюл. № 13.
22. **Баженов В. Г., Зефирова С. В., Осетров С. Л.** Экспериментально-расчетный метод построения истинных диаграмм деформирования при больших деформациях на основе испытаний на твердость // Докл. АН. 2006. Т. 407, № 2. С. 183–185.

23. **Баженов В. Г., Зефирова С. В., Осетров С. Л.** Экспериментально-расчетный метод идентификации деформационных и прочностных свойств материалов // Завод. лаб. Диагностика материалов. 2006. Т. 72, № 9. С. 39–45.
24. **Баженов В. Г., Зефирова С. В., Осетров С. Л.** Метод идентификации деформационных и прочностных свойств металлов и сплавов // Деформация и разрушение материалов. 2007. № 3. С. 43–48.
25. **Баженов В. Г., Ломунов В. К., Осетров С. Л., Павленкова Е. В.** Экспериментально-расчетный метод исследования больших упругопластических деформаций цилиндрических оболочек при растяжении до разрыва и построение диаграмм деформирования при неоднородном напряженно-деформированном состоянии // ПМТФ. 2013. Т. 54, № 1. С. 116–124.
26. **Баженов В. Г., Кибец А. И., Лаптев П. В., Осетров С. Л.** Экспериментально-теоретическое исследование предельных состояний упругопластических стержней различного поперечного сечения при растяжении // Проблемы механики: Сб. ст. к 90-летию со дня рожд. А. И. Ишлинского. М.: Физматлит, 2003. С. 116–123.
27. **Баженов В. Г., Жегалов С. В., Зефирова С. В., Осетров С. Л.** Упругопластическое деформирование и предельные состояния цилиндрических оболочек под действием внутреннего давления при различных граничных условиях // Вестн. Нижегород. гос. ун-та. Сер. Механика. 2003. Вып. 1. С. 90–94.
28. **Баженов В. Г., Крамарев Л. Н., Осетров С. Л.** Экспериментальное и теоретическое исследование упругопластического деформирования и разрушения стального шара при сжатии между пластинами // Проблемы прочности и пластичности: Межвуз. сб. Н. Новгород: Изд-во Нижегород. гос. ун-та, 2003. Вып. 65. С. 85–91.
29. **Баженов В. Г., Зефирова С. В., Кочетков А. В. и др.** Пакет программ “Динамика-2” для решения плоских и осесимметричных нелинейных задач нестационарного взаимодействия конструкций со сжимаемыми средами // Мат. моделирование. 2000. Т. 12, № 6. С. 67–72.
30. **Баженов В. Г.** Большие деформации и предельные состояния упругопластических конструкций // Упругость и неупругость: Материалы Междунар. науч. симп. по проблемам механики деформируемых тел, посвящ. 105-летию со дня рожд. А. А. Ильюшина. М.: Изд-во Моск. гос. ун-та, 2016. С. 136–140.

*Поступила в редакцию 7/VI 2017 г.,
в окончательном варианте — 26/IX 2017 г.*
