

УДК 621.77.014

Титов В. А.
Гараненко Т. Р.**МЕТОД ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНО-АНАЛИТИЧЕСКОГО ПОСТРОЕНИЯ КРИВЫХ ДЕФОРМИРОВАНИЯ МАТЕРИАЛОВ ПРИ ИСПЫТАНИИ НА ИЗГИБ.
СООБЩЕНИЕ 1**

Методики стандартных испытаний для построения кривых деформирования хорошо известны [1]. Базовым методом определения кривых деформирования является испытание на одноосное растяжение [2–4]. Однако испытание на одноосное растяжение образцов, имеющих малое относительное удлинение при растяжении, трудоемко и не обеспечивает необходимой степени точности, например, для композиционных материалов системы *Al – B* относительное удлинение при растяжении составляет не более 0,6% [5].

При реализации процессов с более сложным напряженно-деформированным состоянием, например, при гибке боралюминиевого композиционного материала, максимальные деформации достигают 6–8%.

В процессе изгиба схема напряженного состояния в течение всего процесса деформирования остается постоянной, а основываясь на гипотезе об единой кривой [6], полученные при изгибе кривые деформирования могут быть использованы для различных операций формообразования [7].

Целью работы является разработка метода экспериментально-аналитического построения кривых деформирования на основании испытаний на изгиб, в том числе для труднодеформируемых и малопластичных материалов.

При построении диаграмм деформирования используется феноменологическая модель, в которой распределение деформаций и напряжения не зависит от микроструктуры материала, а отражает его эффективные свойства в целом.

При построении диаграмм для упрощения расчетной схемы принимаем следующие гипотезы и допущения:

- анализ технологической операции сводится к анализу чистого цилиндрического изгиба, то есть влиянием касательных напряжений и сдвиговых деформаций пренебрегаем;
- внутренняя и наружная поверхности деформируемого элемента в зоне изгиба имеют постоянный радиус кривизны;
- пластическая деформация развивается по всему объему металла в очаге деформации;
- основной гипотезой является гипотеза плоских сечений.

Напряженно-деформированное состояние при чистом цилиндрическом изгибе широкой полосы считалось плоским, ввиду того, что относительная деформация в аксиальном направлении затруднена и ее величиной можно пренебречь.

Общая структура определения кривых деформирования состоит из следующих этапов:

- определение вида аппроксимации кривой деформирования, удобного для решения поставленной задачи;
- теоретическое определение системы уравнений для нахождения коэффициентов аппроксимации кривой упрочнения. При этом использовался принцип минимума полной работы, затрачиваемой на деформацию;
- экспериментальное определение работы деформирования и построения экспериментальной кривой;
- определение зависимости удельной работы деформирования от радиуса гибки;
- определение зависимости величины радиуса нейтральной поверхности от радиуса гибки данного материала;
- численное решение системы уравнений для определения коэффициентов аппроксимации.

Для структурно-неоднородных материалов сопротивление деформированию при растяжении и сжатии не одинаково. Это обуславливает смещение радиуса нейтральной поверхности в сторону сжатых волокон [8].

Учитывая, что для широкой полосы принято плоское деформированное состояние, можно записать:

$$e_{rr} = e_{\varphi\varphi}, e_{zz} = 0, e_{r\varphi} = 0 \quad (1)$$

где $e_{rr}, e_{\varphi\varphi}, e_{zz}, e_{r\varphi}$ – компоненты тензора деформаций в цилиндрической системе координат.

Интенсивность деформаций:

$$e_i = \frac{\sqrt{2}}{3} \sqrt{(e_{rr} - e_{\varphi\varphi})^2 + e_{\varphi\varphi}^2 + e_{rr}^2} = \frac{2}{\sqrt{3}} |e_{\varphi\varphi}|. \quad (2)$$

Величину распределения тангенциальных деформаций, учитывая принятую гипотезу плоских сечений и монотонность процесса деформирования, можно представить как:

$$e_{\varphi\varphi} = \ln \frac{r}{\rho}, \quad (3)$$

где ρ – радиус нейтральной поверхности.

При разложении логарифма в ряд с точностью до первого члена:

$$e_{\varphi\varphi} = \frac{r}{\rho} - 1. \quad (4)$$

Интенсивность напряжений σ_i связана с интенсивностью деформаций e_i функционально и описывается кривой деформирования – модель материала.

Для аппроксимации кривой деформирования использовали иррациональный четырехчлен восьмой степени, который обеспечивает достаточно высокую точность описания:

$$\sigma_i = ae_i + be_i^{1/2} + ce_i^{1/4} + de_i^{1/8}. \quad (5)$$

Такая аппроксимация позволяет получить систему уравнений линейного типа, удобную для решения относительно констант аппроксимации a, b, c, d .

При определении разрешающих уравнений работа деформирования определялась зависимостью:

$$A = \int_V \sigma_i e_i dV, \quad (6)$$

где V – объем деформируемого тела.

С учетом (2), (3), (4) и (5) удельная работа по деформированию элемента заготовки единичной длины и ширины в интегральном виде равна:

$$A_{y\partial} = \int_{\rho}^{R_H} \left(a_1 \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^2 \left| \frac{r}{\rho} - 1 \right|^2 + b_1 \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{1/2+1} \left| \frac{r}{\rho} - 1 \right|^{1/2+1} + c_1 \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{1/4+1} \left| \frac{r}{\rho} - 1 \right|^{1/4+1} + d_1 \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{1/8+1} \left| \frac{r}{\rho} - 1 \right|^{1/8+1} \right) dr + \\ + \int_{\rho}^{R_B} \left(a_2 \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^2 \left| \frac{r}{\rho} - 1 \right|^2 + b_2 \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{1/2+1} \left| \frac{r}{\rho} - 1 \right|^{1/2+1} + c_2 \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{1/4+1} \left| \frac{r}{\rho} - 1 \right|^{1/4+1} + d_2 \left(\frac{2}{\sqrt{3}} \right)^{1/8+1} \left| \frac{r}{\rho} - 1 \right|^{1/8+1} \right) dr \quad (7)$$

В уравнение (7) коэффициенты a_1, b_1, c_1, d_1 соответствуют зоне тангенциального растяжения, а коэффициенты a_2, b_2, c_2, d_2 – зоне тангенциального сжатия.

В результате решения уравнения (7) получаем:

$$A_{y\partial} = a_1 \frac{4}{9} \rho \left| \frac{R_H}{\rho} - 1 \right|^3 + b_1 \frac{2\sqrt{8}}{5\sqrt[4]{27}} \rho \left| \frac{R_H}{\rho} - 1 \right|^{5/2} + c_1 \frac{2\sqrt[4]{2}}{9\sqrt[8]{243}} \rho \left| \frac{R_H}{\rho} - 1 \right|^{9/4} + d_1 \frac{16\sqrt[8]{2}}{1\sqrt[16]{19683}} \rho \left| \frac{R_H}{\rho} - 1 \right|^{17/8} + \\ + a_2 \frac{4}{9} \rho \left| \frac{R_B}{\rho} - 1 \right|^3 + b_2 \frac{2\sqrt{8}}{5\sqrt[4]{27}} \rho \left| \frac{R_B}{\rho} - 1 \right|^{5/2} + c_2 \frac{2\sqrt[4]{2}}{9\sqrt[8]{243}} \rho \left| \frac{R_B}{\rho} - 1 \right|^{9/4} + d_2 \frac{16\sqrt[8]{2}}{1\sqrt[16]{19683}} \rho \left| \frac{R_B}{\rho} - 1 \right|^{17/8}. \quad (8)$$

Уравнение (8) содержит 8 неизвестных коэффициентов аппроксимации диаграмм деформированного материала на растяжение (индекс «1») и сжатие (индекс «2»). А также неизвестный параметр – величина радиуса нейтральной поверхности.

Для улучшения сходимости решения системы девяти уравнений и уменьшения объемов экспериментальных работ, получены уравнения второго типа, на основании принципа минимума полной работы деформирования ($\frac{\partial A}{\partial \rho} = 0$):

$$\begin{aligned} \frac{\partial A}{\partial \rho} = & \frac{4(R_H - \rho)^2(\rho + 2R_H)}{9\rho^3} \cdot a_1 + \frac{2\sqrt{8}(R_H - \rho)^{\frac{3}{2}}(\rho + \frac{3}{2}R_H)}{5 \cdot \sqrt[4]{27}\rho^{\frac{5}{2}}} \cdot b_1 + \\ & + \frac{4 \cdot \sqrt[4]{32}(R_H - \rho)^{\frac{5}{4}}(\rho + \frac{5}{4}R_H)}{9 \cdot \sqrt[8]{243}\rho^{\frac{9}{4}}} \cdot c_1 + \frac{8 \cdot \sqrt[8]{512}(R_H - \rho)^{\frac{9}{8}}(\rho + \frac{9}{8}R_H)}{17 \cdot \sqrt[16]{19683}\rho^{\frac{17}{8}}} \cdot d_1 + \\ & + \frac{4(R_B - \rho)^2(\rho + 2R_B)}{9\rho^3} \cdot a_2 + \frac{2\sqrt{8}(R_B - \rho)^{\frac{3}{2}}(\rho + \frac{2}{3}R_B)}{5 \cdot \sqrt[4]{27}\rho^{\frac{5}{2}}} \cdot b_2 + \\ & + \frac{4 \cdot \sqrt[4]{32}(R_B - \rho)^{\frac{5}{4}}(\rho + \frac{5}{4}R_B)}{9 \cdot \sqrt[8]{243}\rho^{\frac{9}{4}}} \cdot c_2 + \frac{8 \cdot \sqrt[8]{512}(R_B - \rho)^{\frac{9}{8}}(\rho + \frac{9}{8}R_B)}{17 \cdot \sqrt[16]{19683}\rho^{\frac{17}{8}}} \cdot d_2 = 0 \end{aligned} \quad (9)$$

Решая систему восьми линейных уравнений, четыре из которых типа (8), а четыре типа (9) при найденных из эксперимента четырех значениях удельной работы и четырех значениях радиуса нейтральной поверхности, определяем искомые константы аппроксимации кривой упрочнения.

Величина удельной работы деформирования определяется экспериментально. Изгиб заготовок осуществлялся на универсальной испытательной машине модели 123У-10 в гибочном штампе. На рис. 1 представлен штамп в сборе для изгиба заготовок на угол π со сменной матрицей и набором пуансонов.

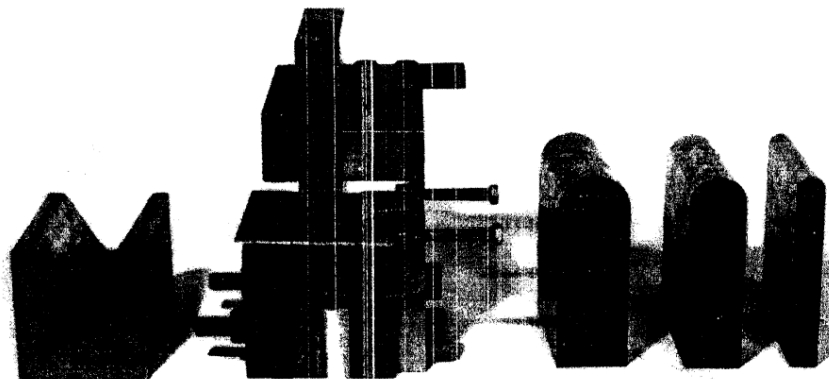


Рис. 1. Универсальный гибочный штамп со сменными пуансонами и матрицами

Для гибки заготовок при повышенных температурах спроектировано и изготовлено специальное приспособление (рис. 2). Приспособление позволяет деформировать заготовку после нагрева внутри специальной муфельной печи.

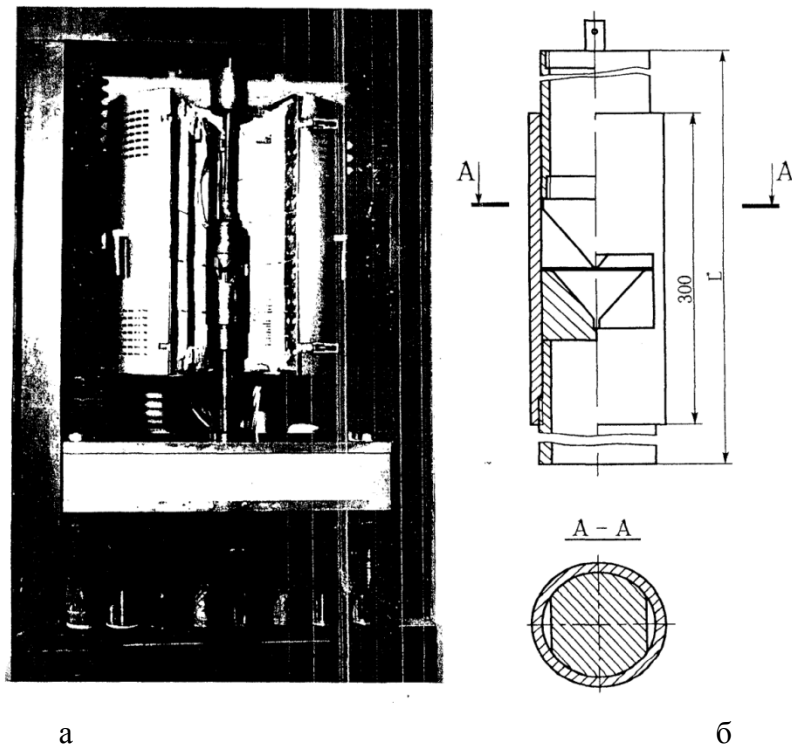


Рис. 2. Приспособление для гибки образцов композита в нагретом состоянии:
 а – приспособление, установленное в элетронагревательной печи испытательной машины 1231У10; б – схема приспособления

Для экспериментального определения работы деформирования заготовок в процессе их изгиба проводилась запись диаграмм ход пуансона – усилие нагружения (разгрузки), по площади которых с учетом масштабных коэффициентов, вычислялись экспериментальные значения работы деформирования. На рис. 3 представлена типовая диаграмма зависимости усилия деформирования заготовки от перемещения пуансона.

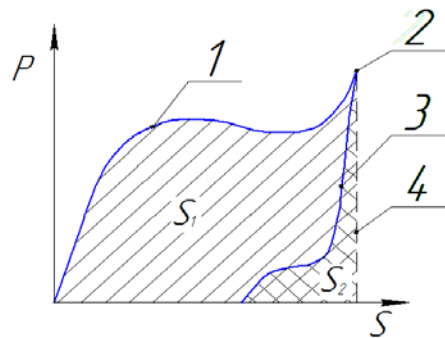


Рис. 3. Типовая диаграмма зависимости усилия деформирования от перемещения пуансона при изгибе заготовки

Кривая 1 описывает изменение нагрузки на пуансоне при изгибе листовой заготовки. Резкое возрастание нагрузки соответствует калибровочному усилию – точке 2, когда радиус практически оформлен, и пуансон сжимает заготовку по толщине. Величина калибрующего усилия в эксперименте не превышала 8% от максимального усилия изгиба, что существенно не влияло на изменение характера напряженно-деформированного состояния заготовки. Процесс нагрузки описывает кривая 3, которая отражает зависимость усилия на пуансоне от величины его обратного хода при упругом восстановлении. Вертикаль 4, нанесенная штриховой линией, отсекает на оси абсцисс максимальную величину хода пуансона. На приведенной диаграмме площадь S_1 , заключенная между кривыми 1,4 и осью абсцисс, определяет величину полной ра-

боты, затраченной на изгиб заготовки, а площадь S_2 (между кривыми 3,4 и осью абсцисс) – величину работы, затрачиваемой на изменение формы заготовки при упругом восстановлении.

Значение соответствующей величины работы определялось с использованием масштабного коэффициента по формуле

$$A_i = \mu_A \cdot S_i \tag{9}$$

В качестве удельных значений энергетических параметров принята величина энергии (полной или упругой), приходящейся на единицу поверхности изогнутого участка заготовки и определяемая по формуле

$$a_{y\partial} = \frac{A_i}{LR_c\alpha} \tag{10}$$

где L – длина заготовки, мм; R_c – радиус серединной поверхности заготовки, мм.

На рис. 4 приведены полученные экспериментально диаграммы удельной работы деформирования заготовки в холодном состоянии в зависимости от относительного радиуса изгиба для исследуемых материалов.

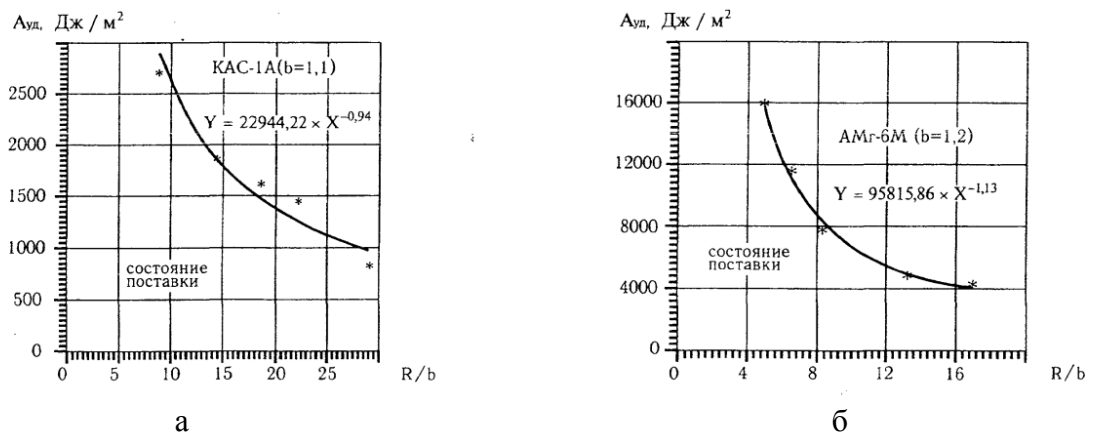


Рис. 4. Зависимость удельной работы деформирования от относительного радиуса при гибке образцов:

а – МКМ ВКА-2; б – алюминиевый сплав АМг6М

На рис. 5 показаны зависимости удельной работы деформирования от относительного радиуса гибки при повышенных температурах.

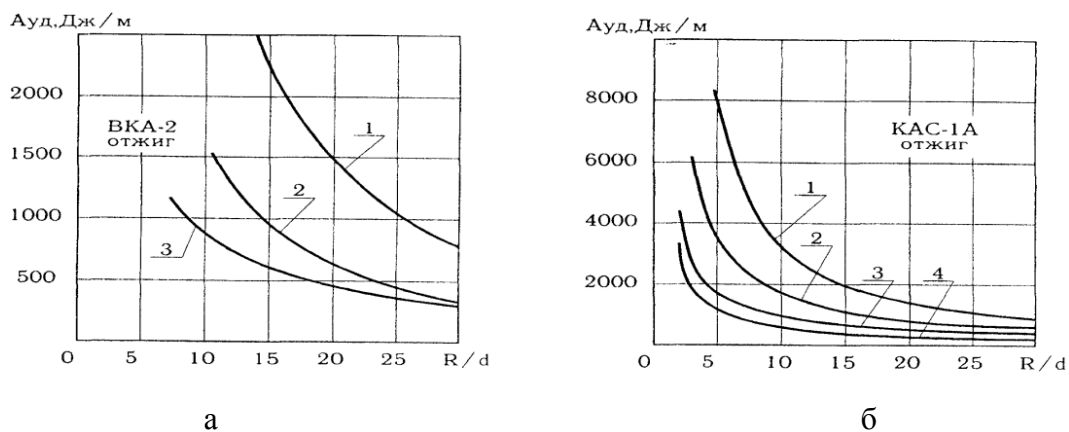


Рис. 5. Зависимости удельной работы деформирования от относительного радиуса гибки в МКМ при различных температурах нагрева:

а – бороалюминиевого ВМКМ ($V_f = 39\%$): 1 – 20^0C ; 2 – 350^0C ; 3 – 450^0C ; б – сталеалюминиевого ВМКМ ($V_f = 25\%$): 1 – 20^0C ; 2 – 250^0C ; 3 – 350^0C ; 4 – 450^0C

Полученные результаты использовались также для сопоставления экспериментальных значений энергетических параметров деформирования исследуемых материалов с теоретическими, вычисленными по методике, разработанной в данной работе.

Принимали допущение, что величина радиуса нейтральной поверхности деформаций и радиус нейтральной поверхности напряжений заготовки равны. Это положение можно считать справедливым для гибки с относительными радиусами не менее 5–6 толщин заготовки. В таком случае схема плоского деформированного состояния не переходит в объемную, а эффектом Баушингера можно пренебречь.

Для определения радиуса нейтральной поверхности деформаций использован способ, основанный на свойстве заготовки сохранять неизменной длину развертки при цилиндрическом изгибе. При этом выполнялись следующие операции:

- изгиб в оснастке мерных заготовок до получения трубчатой формы;
 - измерение минимального и максимального зазоров между торцами трубчатой заготовки.
- Тогда величина радиуса нейтральной поверхности определяется следующей зависимостью:

$$\rho = \frac{\delta(l + z_{\min}) - r(z_{\max} - z_{\min})}{2\pi\delta - (z_{\max} - z_{\min})} \quad (11)$$

где δ – толщина заготовки, мм; l – исходная длина заготовки, мм; r – внутренний радиус трубчатой детали, мм.

Используя этот метод, экспериментально получены зависимости положения нейтральной поверхности заготовки от относительного радиуса гибки для различных материалов.

Полученные данные по работе деформирования и радиусу нейтральной поверхности обеспечивают расчет деформационных свойств материалов с использованием системы уравнений (8) и (9).

Разработанный экспериментально-аналитический метод позволил рассчитать диаграммы деформирования волокнистых МКМ для деформирования при различных температурах нагрева (рис. 6).

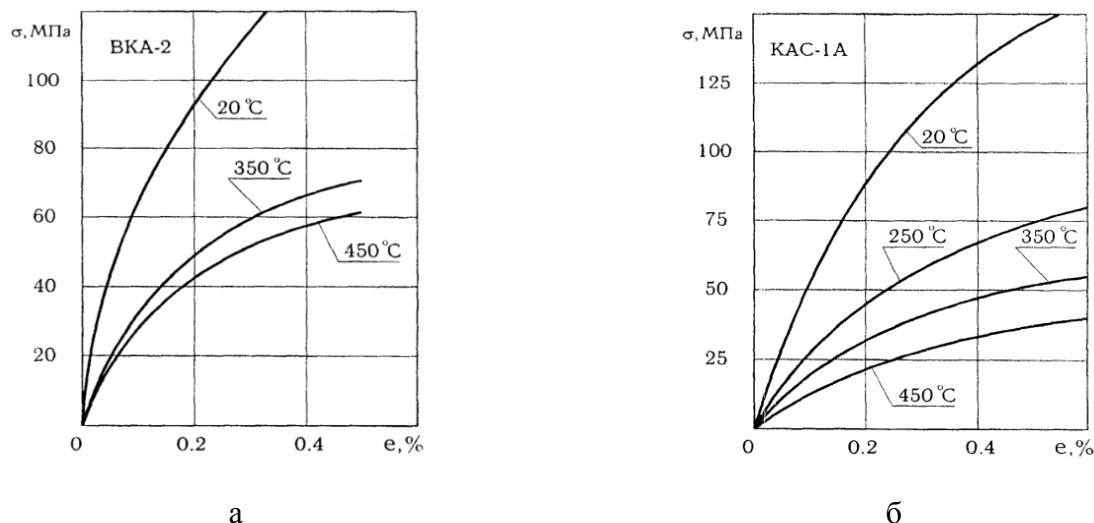


Рис. 6. Диаграммы деформирования волокнистых МКМ на растяжение и сжатие при различных температурах нагрева

Кривые деформирования, полученные на основе разработанного метода, на 6–8% отличаются от кривых построенных по стандартным методикам.

ВЫВОДЫ

Разработан метод экспериментально-аналитического построения кривых деформирования на основании испытаний на изгиб. Данный метод целесообразно использовать как для гомогенных, так и для труднодеформируемых материалов с ограниченной пластичностью. По-

лученные кривые деформирования материала используем для разных операций формообразования, основываясь на гипотезе об единой кривой.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Смирнов-Аляев Г. А. *Экспериментальные исследования в обработке металлов давлением* / Г. А. Смирнов-Аляев, В. П. Чикидовский. – Ленинград : Машиностроение, 1972. – 360 с.
2. ГОСТ 1497-84. *Металлы. Методы на испытаний на растяжение.*
3. Алимов А. И. *Влияние трения на точность определения напряжения текучести при построении кривых упрочнения с помощью испытаний на одноосное сжатие* / А. И. Алимов, А. В. Власов, С. А. Евсюков // *Обработка материалов давлением.* – 2013. – № 2. – С. 53–59.
4. *Восстановление кривой упрочнения материала по результатам эксперимента на сжатие* / Н. Н. Берендеев [и др] // *Проблемы прочности и пластичности.* – 2015. – Т. 77. – № 1. – С. 75–84.
5. *Конструкции и металлических композиционных материалов* / Г. А. Кривов [и др]. – К. : Техніка, 1992. – 224 с.
6. *Исаченков Е. И. Штамповка резиной и жидкостью* / Е. И. Исаченков. – Москва : Машиностроение, 1967. – 367 с.
7. ГОСТ 14019-80 *Металлы. Методы испытания на изгиб.*
8. *Моделирование и расчет элементов конструкций из неоднородных материалов* / Н. А. Шульга, Г. А. Кривов, Ю. М. Федоренко, В. А. Титов. – К. : Техніка, 1996. – 243 с.

REFERENCES

1. *Smirnov-Aljaev G. A. Jeksperimental'nye issledovanija v obrabotke metallov davleniem* / G. A. Smirnov-Aljaev, V. P. Chikidovskij. – Leningrad : Mashinostroenie, 1972. – 360 s.
2. *GOST 1497-84. Metally. Metody na ispytanj na rastjazhenie.*
3. *Alimov A. I. Vlijanie trenija na tochnost' opredelenija naprjazhenija tekuchesti pri postroenii krivyh uprochnenija s pomoshh'ju ispytanj na odnoosnoe szhatie* / A. I. Alimov, A. V. Vlasov, S. A. Evsjukov // *Obrabotka materialov davleniem.* – 2013. – № 2. – S. 53–59.
4. *Vosstanovlenie krivoj uprochnenija materiala po rezul'tatam jeksperimenta na szhatie* / N. N. Berendejev [i dr] // *Problemy prochnosti i plastichnosti.* – 2015. – T. 77. – № 1. – S. 75–84.
5. *Konstrukcii i metallicheskih kompozicionnyh materialov* / G. A. Krivov [i dr]. – K. : Tehnika, 1992. – 224 s.
6. *Isachenkov E. I. Shtampovka rezinoj i zhidkost'ju* / E. I. Isachenkov. – Moskva : Mashinostroenie, 1967. – 367 s.
7. *GOST 14019-80 Metally. Metody ispytanj na izgib.*
8. *Modelirovanie i raschet jelementov konstrukcij iz neodnorodnyh materialov* / N. A. Shul'ga, G. A. Krivov, Ju. M. Fedorenko, V. A. Titov. – K. : Tehnika, 1996. – 243 s.

Титов В. А. – д-р техн. наук, проф. НТУУ «КПИ»;

Гараненко Т. Р. – аспирант НТУУ «КПИ».

НТУУ «КПИ» – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев.

E-mail: tetiana.garanenko@gmail.com

Статья поступила в редакцию 26.09.2015 г.