

СНИЖЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОБРАБОТАННЫХ ДОРНОВАНИЕМ ТОЛСТОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРАХ ПЛАСТИЧЕСКИМ РАСТЯЖЕНИЕМ

*В.Ф. СКВОРЦОВ, канд. техн. наук, доцент
А.Ю. АРЛЯПОВ, канд. техн. наук, доцент
И.И. ОГОЛЬ, ассистент
В.С. ФЕДОТОВ, магистрант
(ТПУ, г. Томск)*

Поступила 30 января 2014
Рецензирование 20 марта 2014
Принята к печати 24 марта 2014

Скворцов В.Ф. – 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30,
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
e-mail: TMRI@tpu.ru

Представлены методика и результаты экспериментальных исследований возможности снижения остаточных напряжений в обработанных дорнованием цилиндрах из стали 45 с диаметром отверстий 5 мм и степенью толстостенности D/d , равной 2 и 3, пластическим растяжением. Установлено, что уже при осевой пластической деформации растяжения 0,005 происходит значительное уменьшение окружных остаточных напряжений в этих цилиндрах; при увеличении этой деформации до 0,015...0,020 окружные остаточные напряжения снижаются по абсолютной величине со 140...500 МПа до 30...50 МПа. Приведены расчетные зависимости для оценки точности диаметральных размеров цилиндров после их пластического растяжения. Показано, что точность отверстий диаметром не более 5 мм при пластическом растяжении обработанных дорнованием цилиндров снижается менее чем на один квалитет.

Ключевые слова: дорнование отверстий, толстостенные цилиндры, остаточные напряжения, пластическое растяжение, точность отверстий.

Введение

Дорнование глубоких отверстий малого диаметра ($d = 1...5$ мм, $L/d \leq 100$, где L – глубина отверстий) в деталях типа толстостенных цилиндров, выполняемое твердосплавными инструментами с большими натягами (до $0,1d$ и более), является высокопроизводительным методом их отделочной обработки. Оно может быть использовано сразу после сверления отверстий спиральными сверлами, позволяя повысить точность диаметра отверстий с IT11–IT 13 до IT 7, уменьшить шероховатость поверхности с $Ra = 2,5...5$ мкм до $Ra = 0,1...1$ мкм, а также значительно упрочнить поверхностный слой и сформировать в нем благоприятные сжимающие

остаточные напряжения [1–3]. В то же время необходимо иметь в виду, что после дорнования с большими натягами во всем объеме толстостенных цилиндров возникают высокие остаточные напряжения [1–3]. Если при дальнейшей обработке с цилиндров удаляются значительные припуски (напуски), то вследствие перераспределения остаточных напряжений имеют место их существенные деформации и снижение точности [4–9]. Это возможно также из-за релаксации остаточных напряжений с течением времени [8].

Анализ литературы [10–12] показал, что одним из эффективных методов снижения остаточных напряжений в изделиях простой геометрической формы является метод пластического растяжения с малыми деформациями, который

в отличие от отжига позволяет сохранить исходную структуру и механические свойства металла. Экспериментально установлено, что при пластических деформациях растяжения $\epsilon_p = 0,01 \dots 0,02$ остаточные напряжения в алюминиевых плитах и стальных стержнях снимаются почти полностью [10, 11]. В связи с изложенным значительный интерес представляет изучение возможностей указанного метода для снижения остаточных напряжений в цилиндрах после дорнования. Цель работы – установить закономерности изменения остаточных напряжений в обработанных дорнованием толстостенных цилиндрах и их точности при пластическом растяжении.

Методика исследования

Эксперименты проводились на образцах (рис. 1) из стали 45 (НВ 1800...2000 МПа) с диаметром отверстий $d = 5$ мм и наружным диаметром D , равным 10 и 15 мм, что соответствовало степеням толстостенности D/d образцов, равных 2 и 3.

Суть экспериментов состояла в измерении деформаций образцов и определении в них остаточных напряжений после дорнования и последующего пластического растяжения. Отверстия в образцах сверлили и рассверливали спиральными сверлами на токарном станке. Дорнование отверстий выполняли однозубыми дорнами из твердого сплава ВК8 с углами рабочего и обратного конусов 6° и шириной соединяющей их цилиндрической ленточки 3 мм. Эту обработку осуществляли с помощью специального приспособления [1] по схеме растяжения на универсальной испытательной машине УМЭ-10ТМ при скорости 0,008 м/с. Для обеспечения высокой точности и качества поверхностного слоя отверстий дорнование проводили в два цикла. Натяг при первом цикле составлял около 0,3 мм, при втором – 0,05 мм. В качестве смазоч-

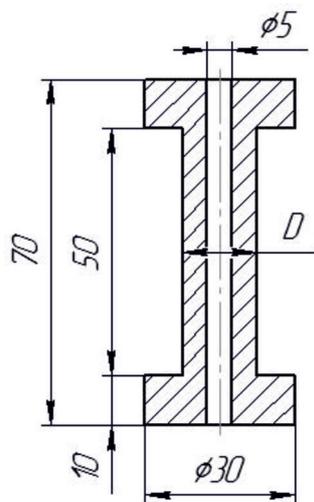


Рис. 1. Экспериментальный образец

ного материала при дорновании использовали жидкость МР-7. Пластическое растяжение образцов выполняли с помощью специального ручного винтового приспособления. При этом осевую пластическую деформацию изменяли от нуля до 0,023.

Окружные остаточные деформации на поверхности отверстия и наружной поверхности образцов определяли по изменению их диаметров. Диаметр отверстий измеряли нутромером фирмы «Carl Zeiss Jena» (ФРГ) с ценой деления 0,01 мм, диаметр наружной поверхности – рычажным микрометром МР25 с ценой деления 0,002 мм. Осевую остаточную деформацию образцов находили на их наружной поверхности по изменению расстояния между нанесенными на эту поверхность отпечатками конического индентора. Для измерения этой деформации использовался универсальный измерительный микроскоп УИМ–21 с ценой деления 0,001 мм.

В ходе исследований ограничивались приближенной оценкой окружных остаточных напряжений, которые при дорновании отверстий в толстостенных образцах существенно превышают по абсолютной величине радиальные и осевые остаточные напряжения [1–3]. Окружные остаточные напряжения σ_θ определяли после отрезки головок по изменению срединного диаметра образца (полого цилиндра с наружным диаметром D) при его разрезке вдоль образующей (гиперболический закон распределения напряжений изгиба). Расчет выполняли по формуле [13], которая в принятых нами обозначениях имеет вид

$$\sigma_\theta = \frac{1}{1 - \mu^2} \frac{E}{D_c - 2\gamma} \left(\frac{-\frac{t}{2} + b + \gamma}{-\frac{t}{2} + b + \frac{D_c}{2}} \right) \Delta D_c,$$

где μ – коэффициент Пуассона материала образца; E – его модуль продольной упругости; D_c – диаметр срединной поверхности образца; γ – расстояние от нейтральной оси сечения стенки образца до центра его тяжести; t – толщина стенки образца; b – расстояние от рассматриваемой точки до его отверстия; ΔD_c – приращение диаметра срединной поверхности образца при его разрезке вдоль образующей. Расстояние γ находили по формуле [13]

$$\gamma = r - \rho = \frac{D_c}{2} - \frac{t}{\ln \frac{D}{D-2t}},$$

в которой r и ρ – соответственно радиусы срединной поверхности образца и его нейтрального слоя; D – наружный диаметр образца (при разрезке считается неизменным).

Для исключения дополнительных остаточных напряжений в образцах при отрезке головок и разрезке вдоль образующей эти операции выполняли дисковой отрезной фрезой толщиной 1 мм при обильном охлаждении водной эмульсией. Значение ΔD_c определяли по приращению Δ расстояния между отпечатками конического индентора на срединной окружности торца образцов, используя соотношение $\Delta D_c = \Delta / \pi$.

Указанное расстояние до и после разрезки (до разрезки оно составляло около 4 мм) измеряли на микроскопе УИМ-21.

Результаты и обсуждение

На рис. 2 приведены зависимости окружных остаточных напряжений от расстояния до образующей отверстия образцов различной толстостенности после дорнования с указанными выше натягами. Как видно из рис. 2, у поверхности отверстия (в прилегающей к нему области образцов) формируются сжимающие окружные остаточные напряжения, которые уравновешиваются растягивающими напряжениями в области, прилегающей к наружной поверхности образцов. Наибольшие по абсолютной величине окружные остаточные напряжения имеют место на поверхности отверстия. При увеличении степени толстостенности образцов D/d от 2 до 3 эти напряжения возрастают со 140 до 500 МПа и становятся больше предела текучести стали 45 ($\sigma_{0,2} \approx 360$ МПа). Столь высокий уровень окружных остаточных напряжений, видимо, объясняется тем, что в прилегающей к отверстию образца области остаточное напряженное состояние после дорнования с принятыми натягами близко к всестороннему сжатию [1–3]. В этом случае, как известно [14], величина остаточных напряжений не ограничивается пределом текучести материала образца.

На рис. 3 показаны зависимости окружных остаточных напряжений на поверхности отвер-

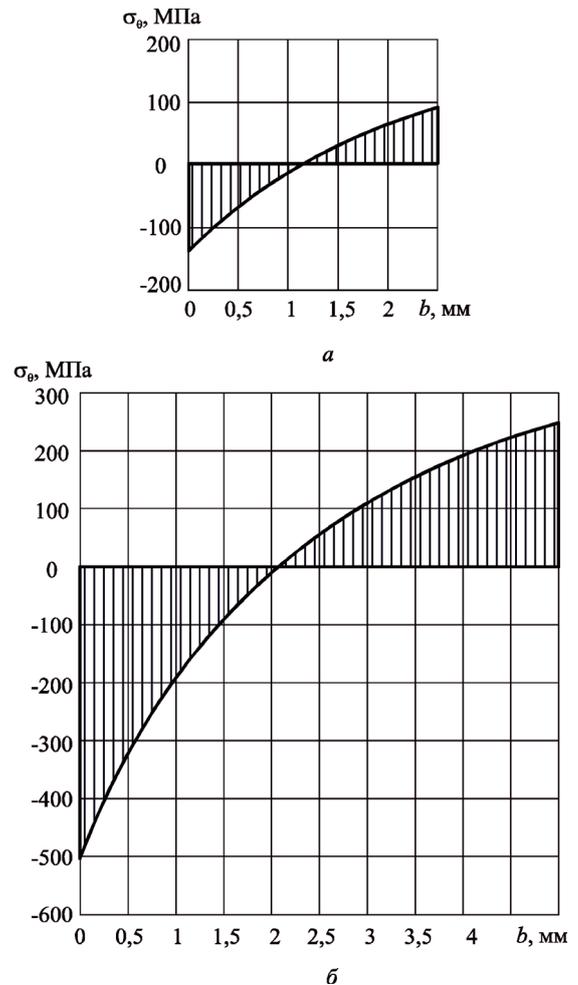


Рис. 2. Зависимости окружных остаточных напряжений в обработанных дорнованием толстостенных цилиндрах от расстояния от поверхности отверстия:

$a - D = 10$ мм ($D/d = 2$); $b - D = 15$ мм ($D/d = 3$)

ствия обработанных дорнованием образцов (σ_θ^{\max}) различной степени толстостенности от величины осевой пластической деформации при растяжении (ϵ_p). Видно, что уже при $\epsilon_p = 0,005$ имеет место значительное снижение остаточных напряжений. При увеличении ϵ_p до $0,015 \dots 0,020$ окружные остаточные напряжения у поверхности отверстия уменьшаются со $140 \dots 500$ МПа до $30 \dots 50$ МПа, т. е. в 5...10 раз.

Необходимо подчеркнуть, что при растяжении образцов диаметры их отверстия и наружной поверхности уменьшаются, а также изменяется точность этих диаметров. Их значения после растяжения составят:

$$d_p = d_d (1 - \mu \epsilon_p);$$

$$D_p = D_d (1 - \mu \epsilon_p),$$

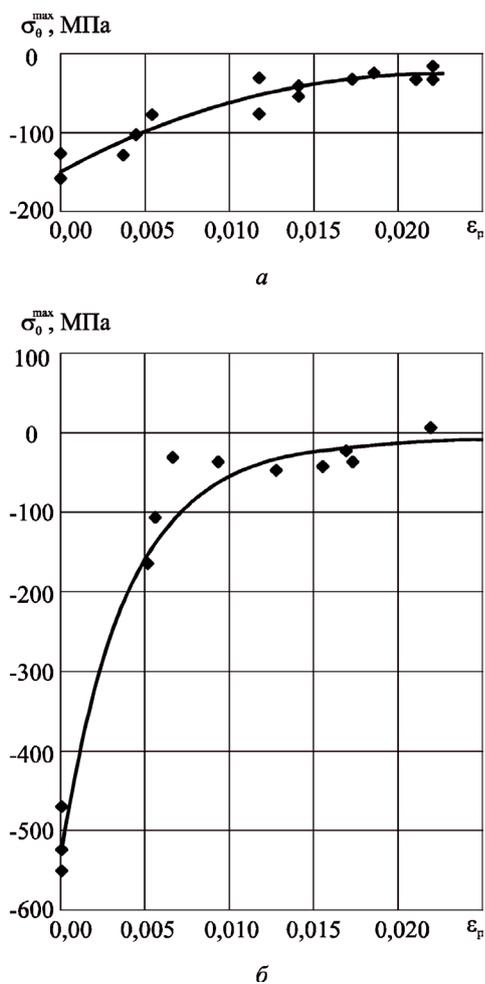


Рис. 3. Зависимости окружных остаточных напряжений у поверхности отверстия обработанных дорнованием толстостенных цилиндров от пластической деформации при их растяжении:

$$a - D/d = 2; \quad b - D/d = 3$$

где d_p, D_p – диаметры отверстия и наружной поверхности образца после дорнования; μ – коэффициент Пуассона, который при пластическом деформировании приближенно принимается равным 0,5. С учетом этого приведенные выше зависимости запишутся следующим образом:

$$d_p = d_d (1 - 0,5\epsilon_p);$$

$$D_p = D_d (1 - 0,5\epsilon_p).$$

Средние квадратические отклонения диаметров отверстия и наружной поверхности образцов после растяжения ввиду независимости случайных величин d_d и ϵ_p (D_d и ϵ_p) в соответствии с теоремами о числовых характеристиках функций [15] составят:

$$\sigma_{d_p} = \sqrt{0,25\sigma_{\epsilon_p}^2 (\sigma_{d_d}^2 + \bar{d}_d^2) + (1 - 0,5\bar{\epsilon}_p)^2 \sigma_{d_d}^2};$$

$$\sigma_{D_p} = \sqrt{0,25\sigma_{\epsilon_p}^2 (\sigma_{D_d}^2 + \bar{D}_d^2) + (1 - 0,5\bar{\epsilon}_p)^2 \sigma_{D_d}^2},$$

где \bar{d}_d, \bar{D}_d – соответственно средние значения диаметров отверстия и наружной поверхности образцов после дорнования; $\bar{\epsilon}_p$ – среднее значение деформаций растяжения; $\sigma_{d_d}, \sigma_{D_d}, \sigma_{\epsilon_p}$ – средние квадратические отклонения этих величин.

Так как эти формулы подобны, то проанализируем только первую из них. На рис. 4 подсчитанные по ней средние квадратические отклонения диаметров отверстий образцов после растяжения сопоставлены с их значениями после дорнования. Расчет выполнен для среднего значения деформации растяжения $\bar{\epsilon}_p = 0,02$ и среднего квадратического отклонения этой деформации $\sigma_{\epsilon_p} = 0,0006$. Такое значение σ_{ϵ_p} , как

показали эксперименты, может быть технологически обеспечено без существенных затруднений. Из рис. 4 видно, что отношение $\sigma_{d_p} / \sigma_{d_d}$ сильно зависит от σ_{d_d} и \bar{d}_d . При малых σ_{d_d}

это отношение существенно превышает единицу, по мере увеличения σ_{d_d} оно снижается, достигает единицы и даже становится несколько меньшим ее. Такой характер зависимости $\sigma_{d_p} / \sigma_{d_d}$ от σ_{d_d} объясняется двояким влиянием

растяжения на точность диаметра отверстий σ_{d_p} . С одной стороны, из-за рассеивания деформаций ϵ_p точность диаметра отверстий, обеспеченная дорнованием σ_{d_d} , при растяжении пада-

ет, с другой – при растяжении сильнее уменьшаются большие (в пределах поля рассеивания) диаметры отверстий, что способствует повышению этой точности. При высокой точности диаметра отверстий после дорнования (малом σ_{d_d}) при растяжении преобладает влияние

рассеивания его деформаций; при снижении точности диаметра отверстий после дорнования (увеличении σ_{d_d}) преобладающим становится

уточнение этого диаметра, вызываемое растяжением. С увеличением среднего значения диаметра

тров отверстий \bar{d}_d отношение $\sigma_{d_p} / \sigma_{d_d}$ возрастает (рис. 4, а и б).

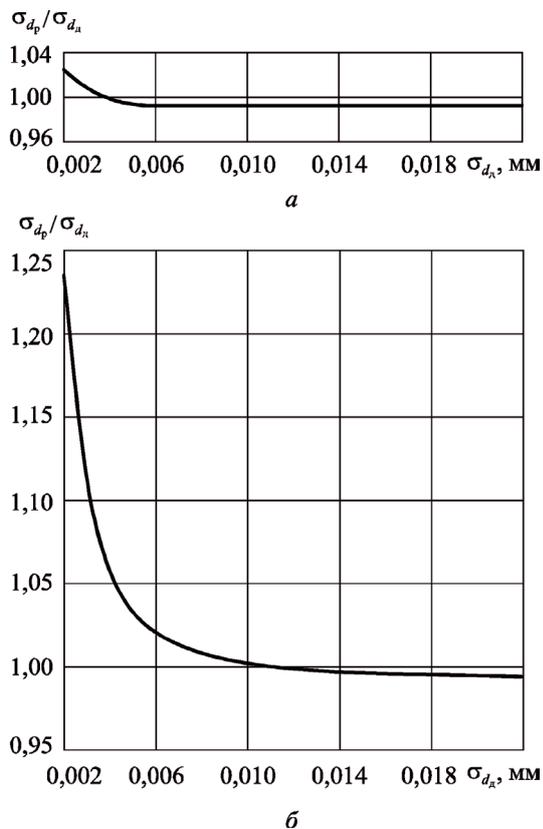


Рис. 4. Отношения средних квадратических отклонений диаметров отверстий после растяжения и дорнования в зависимости от их средних квадратических отклонений после дорнования:

$$a - \bar{d}_d = 2 \text{ мм}; \quad б - \bar{d}_d = 5 \text{ мм}$$

В целом растяжение образцов сопровождается относительно небольшим снижением точности отверстий малого диаметра ($\bar{d}_d \leq 5$ мм). Так, при $\sigma_{d_d} = 0,002$ мм, которое при нормальном распределении диаметров отверстий после дорнования соответствует полю их рассеивания $\omega_{d_d} = 6\sigma_{d_d} = 0,012$ мм, после растяжения с указанными выше параметрами отношение $\sigma_{d_p} / \sigma_{d_d}$ составит: при $\bar{d}_d = 2$ мм – 1,04; при $\bar{d}_d = 5$ мм – 1,24. Другими словами, точность диаметров этих отверстий, обеспеченная дорнованием, при растяжении снизится соответственно в 1,04 и 1,24 раза, что существенно меньше, чем на один квалитет.

В заключение отметим, что наиболее целесообразно использование рассмотренного метода снижения остаточных напряжений при изготовлении длинных толстостенных цилиндров с отверстиями малого диаметра.

Выводы

1. Для цилиндров из стали 45 при увеличении степени их толстостенности от 2 до 3 окружные остаточные напряжения после дорнования с режимом, обеспечивающим высокую точность отверстий, возрастают по абсолютной величине со 140 до 500 МПа.

2. Пластическое растяжение с осевыми деформациями 0,015...0,020 позволяет снизить окружные остаточные напряжения в обработанных дорнованием толстостенных цилиндрах с указанных выше значений до 30...50 МПа, т. е. в 5...10 раз.

3. При пластическом растяжении этих цилиндров точность диаметра отверстий (при его значениях не более 5 мм) снижается менее чем на один квалитет.

Список литературы

1. Сворцов В.Ф., Арляпов А.Ю., Охотин И.С. Дорнование глубоких отверстий малого диаметра // Справочник. Инженерный журнал. Приложение. – 2012. – № 2. – С. 1–24.
2. Охотин И.С., Сворцов В.Ф. Дорнование глубоких отверстий малого диаметра с большими натягами. – Германия: LAP LAMBERT Academic Publishing, 2011. – 170 с.
3. Сворцов В.Ф., Охотин И.С., Арляпов А.Ю. Остаточные напряжения при дорновании отверстий малого диаметра с большими натягами // Известия Томского политехнического университета. – Томск: ТПУ. – 2010. – Т. 316, № 2. – С. 24–27.
4. Монченко В.П. Эффективная технология производства полых цилиндров. – М.: Машиностроение, 1980. – 248 с.
5. Проскуряков Ю.Г. Дорнование отверстий. – Свердловск: Машгиз, 1961. – 192 с.
6. Проскуряков Ю.Г., Исаев А.Н., Попов Л.В., Вальяев Ф.Ф. Остаточные напряжения и точность деталей, обработанных дорнованием // Вестник машиностроения. – 1973. – №7. – С. 57–60.
7. Проскуряков Ю.Г., Романов В.Н., Исаев А.Н. Объемное дорнование отверстий. – М.: Машиностроение, 1984. – 224 с.
8. Розенберг А.М., Розенберг О.А. Механика пластического деформирования в процессах резания и

деформирующего протягивания. – Киев: Наукова думка, 1990. – 320 с.

9. Розенберг А.М., Розенберг О.А., Гриценко Э.И., Посвятенко Э.К. Качество поверхности, обработанной деформирующим протягиванием. – Киев: Наукова думка, 1977. – 187 с.

10. Алюминий / под ред. А.Т. Туманова, Ф.И. Квацова, И.Н. Фридляндера; пер. с англ. – М.: Металлургия, 1972. – 664 с.

11. Вишняков Я.Д., Пискарев В.Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах. – М.: Металлургия, 1989. – 254 с.

12. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. Деформация и разрушение. – М.: Машиностроение, 1974. – 472 с.

13. Бабичев М.А. Методы определения внутренних напряжений в деталях машин. – М.: Изд-во АН СССР, 1955. – 132 с.

14. Биргер И.А. Остаточные напряжения. – М.: МАШГИЗ, 1963. – 232 с.

15. Вентцель Е.С. Теория вероятностей. – М.: Высшая школа, 1999. – 576 с.

OBRAVOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2(63), April – June 2014, Pages 14–20

Reduction of residual stresses in mandrelled thick-walled cylinders

Skvortsov V.F., Ph.D. (Engineering), Associate Professor, e-mail: TMRI@tpu.ru

Arlyapov A.Y., Ph.D. (Engineering), Associate Professor

Ogol I.I., Assistant

Fedotov V.S., Undergraduate Student

National Research Tomsk Polytechnic University, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russian Federation

Abstract

The methodology and results of experimental studies on possibility to reduce residual stresses in the mandrelled cylinders of steel grade 45 (0.45% C) with 5 mm diameter hole and with a wall thickness ratios 2 and 3 by plastic tension are presented in the article. It is found that even when the axial tensile plastic deformation is 0.005 significant decrease in the district of residual stresses in these cylinders occurs; with deformation increasing up to 0.015...0.020 county residual stresses are reduced in magnitude from 140...500 MPa to 30...50 MPa. The relationships calculated to estimate accuracy of diametric dimensions of the cylinders after plastic tension are given. It is shown that plastic tension of mandrelled cylinders reduces accuracy of holes with a diameter less than 5 mm by less than one accuracy grade. It is noted that the considered method of reducing residual stresses is the most appropriate to use in the manufacture of long cylinders.

Keywords:

mandreling, thick-walled cylinders, residual stresses, plastic tension, accuracy of holes.

References

1. Skvortsov V.F., Arlyapov A.Yu., Okhotin I.S. Dornovanie glubokikh otverstii malogo diametra [Small diameter deep hole mandrelling]. *SPRAVOCHNIK. Inzhenernyi zhurnal – HANDBOOK. An Engineering Journal*, 2012, no. 2, appendix, pp. 1–24.
2. Okhotin I.S., Skvortsov V.F. *Dornovanie glubokikh otverstii malogo diametra s bol'shimi natiagami* [Mandrelling deep small holes with big tightness]. Germany, LAP LAMBERT Academic Publ., 2011. 170 p.
3. Skvortsov V.F., Okhotin I.S., Arlyapov A.Yu. Ostatechnye napriazheniia pri dornovanii otverstii malogo diametra s bol'shimi natiagami [Residual stresses at mandrelling small holes with big tightness]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta - Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, Vol. 316, no. 2, pp. 24–27.
4. Monchenko V.P. *Effektivnaia tekhnologiia proizvodstva polykh tsilindrov* [Effective technology for the production of hollow cylinders]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980. 248 p.

5. Proskuriakov Yu.G. *Dornovanie otverstii* [Mandrelling holes]. Sverdlovsk, Mashgiz Publ., 1961. 192 p.
6. Proskuriakov Yu.G., Isaev A.N., Popov L.V., Valiaev F.F. *Ostatochnye napriazheniia i tochnost' detalei, obrabotannykh dornovaniem* [Residual stresses and accuracy parts treated mandrelling]. *Vestnik Mashinostroeniya - Russian Engineering Research*, 1973, no. 7, pp. 57–60.
7. Proskuriakov Yu.G., Romanov V.N., Isaev A.N. *Ob "emnoe dornovanie otverstii* [Volume mandrelling holes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 224 p.
8. Rozenberg A.M., Rozenberg O.A. *Mekhanika plasticheskogo deformirovaniia v protsessakh rezaniia i deformiruiushchego protiagivaniia* [Mechanics of plastic deformation in the process of cutting and pulling the deforming]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1990. 320 p.
9. Rozenberg A.M., Rozenberg O.A., Gritsenko E.I., Posviatenko E.K. *Kachestvo poverkhnosti, obrabotannoi deformiruiushchim protiagivaniem* [Quality of treated surface deforming pulling]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1977. 187 p.
10. Tumanov A.T., Kvasov F.I., Fridliander I.N. *Aliuminii* [Aluminium]. Moscow, Metallurgii Publ., 1972. 664 p.
11. Vishniakov Ya.D., Piskarev V.D. *Upravlenie ostatochnymi napriazheniiami v metallakh i splavakh* [Control residual stresses in metals and alloys]. Moscow, Metallurgii Publ., 1989. 254 p.
12. Fridman Ya.B. *Mekhanicheskie svoistva metallov. Deformatsiia i razrushenie* [Mechanical properties of metals. The deformation and fracture]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974. 472 p.
13. Babichev M.A. *Metody opredeleniia vnutrennikh napriazhenii v detaliakh mashin* [Methods for determination of internal stresses in machine parts]. Moscow, AS USSR Publ., 1955. 132 p.
14. Birger I.A. *Ostatochnye napriazheniia* [Residual Stresses]. Moscow, MASHGIZ Publ., 1963. 232 p.
15. Venttsel' E.S. *Teoriia veroiatnostei* [Probability Theory]. Moscow, Vysshaia shkola Publ., 1999. 576 p.

Received 30 January 2014

Revised 20 March 2014

Accepted 24 March 2014