

ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИ ДОРНОВАНИИ ОТВЕРСТИЙ В ТОЛСТОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРАХ ПО СХЕМАМ СЖАТИЯ И РАСТЯЖЕНИЯ

*В.Ф. СКВОРЦОВ, канд. техн. наук, доцент,
Р.С. ЦЫГАНКОВ, магистр,
А.О. БОЗНАК, магистрант,
В.С. ФЕДОТОВ, магистрант
(ТПУ, Томск)*

Поступила 30 мая 2014

Рецензирование 30 июня 2014

Принята к печати 17 июля 2014

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

Приведена методика и результаты экспериментального исследования методом Закса остаточных напряжений в толстостенных цилиндрах из стали 45 с диаметром отверстий 5 мм, наружным диаметром 15 мм, высотой 50 мм после дорнования по схемам сжатия и растяжения с натягами, обеспечивающими высокую точность отверстий. Установлено, что при переходе от схемы сжатия к схеме растяжения возрастают осевая и радиальная и уменьшаются окружные остаточные деформации на поверхности отверстия и наружной поверхности цилиндров. При этом наибольшие по абсолютной величине остаточные напряжения в них увеличиваются: окружные – с 285 до 320 МПа; радиальные – со 105 до 115 МПа; осевые – с 20 до 60 МПа. Показано, что характер распределения остаточных напряжений в цилиндрах не зависит от использованной схемы дорнования.

Ключевые слова: дорнование отверстий, схемы сжатия и растяжения, толстостенные цилиндры, остаточные напряжения.

Введение

Дорнование отверстий сопровождается формированием в деталях значительных остаточных напряжений [1, 2]. Наибольшими по абсолютной величине являются окружные остаточные напряжения, которые определяют важнейшие эксплуатационные свойства деталей: усталостную прочность [3], износостойкость [4, 5], точность [1, 4, 6, 7] и др.

Высокий уровень остаточных напряжений имеет место при дорновании отверстий в полых цилиндрах. При отношениях наружного диаметра цилиндра к диаметру отверстия $D/d = 1,3 \dots 3,0$ у поверхности последнего в зависимости от натяга дорнования могут возникать

как сжимающие, так и растягивающие окружные остаточные напряжения [5, 6, 8, 9]. Абсолютная величина этих напряжений может быть близка к пределу текучести $\sigma_{0,2}$ материала детали. Для формирования сжимающих окружных остаточных напряжений у отверстия, способствующих повышению эксплуатационных свойств цилиндров, последний цикл дорнования необходимо выполнять с малым (около $0,01d$) натягом [8]. Если у цилиндров $D/d > 3$, то у их отверстия после дорнования как правило образуются только сжимающие окружные остаточные напряжения, которые по абсолютной величине могут значительно превышать предел текучести материала деталей [10–12].

Анализ указанной выше литературы показал, что все исследования остаточных напряжений проведены при дорновании отверстий по схеме сжатия. Между тем дорнование отверстий в длинных цилиндрах, обладающих низкой продольной устойчивостью, целесообразно, как показано в работах [6, 7], выполнять по схеме растяжения. Если цилиндр обладает высокой продольной устойчивостью и имеет на конце бурт, то дорнование отверстий в нем одинаково успешно может быть выполнено как по схеме сжатия, так и по схеме растяжения. Очевидно, что для выбора схемы дорнования, а также в целом для оценки эффективности его применения при изготовлении толстостенных цилиндров необходимо располагать сведениями о влиянии этой схемы на остаточные напряжения. Цель работы – экспериментально исследовать остаточные деформации толстостенных цилиндров и образующиеся в них остаточные напряжения при дорновании по схемам сжатия и растяжения.

Методика исследования

Эксперименты проводили на образцах из стали 45 (НВ 1800...2000 МПа) с диаметром отверстий $d = 5$ мм и наружным диаметром $D = 15$ мм, рабочей длиной $L = 50$ мм (рис. 1). Отверстия в образцах получали сверлением и рассверливанием спиральными сверлами на токарном станке. Дорнование отверстий выполняли на испытательной машине УМЭ-10ТМ с помощью специального приспособления [13] по схемам сжатия (рис. 1, а) и растяжения (рис. 1, б). При этом использовали однозубые дорны из твердого сплава ВК8 с углами рабочего и обратного конусов 6° и шириной соединя-

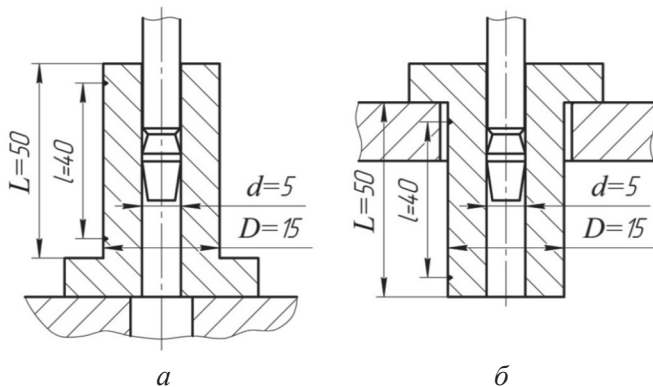


Рис. 1. Схемы дорнования отверстий:
а – сжатия; б – растяжения

ющей их цилиндрической ленточки 3 мм. Для обеспечения высокой точности и качества поверхностного слоя отверстий дорнование производили за два цикла. Натяг при первом цикле составлял около 0,3 мм, при втором – 0,05 мм. В качестве смазочного материала при дорновании использовали жидкость МР-7. Скорость дорнования была равной 0,008 м/с.

Суть экспериментов состояла в определении остаточных деформаций образцов после дорнования по схемам сжатия и растяжения и остаточных напряжений в них.

Окружные остаточные деформации на поверхности отверстия и наружной поверхности образцов после дорнования находили 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 определяли на их наружной поверхности по изменению расстояния $l = 40$ мм между нанесенными на эту поверхность отпечатками конического индентора (см. рис. 1). Для измерения этой деформации использовали универсальный измерительный микроскоп УИМ-21 с ценой деления 0,001 мм.

Для определения остаточных напряжений бурт у образцов отрезали на электроэрозионном проволочно-вырезном станке с ЧПУ модели ДК 7725 (КНР), а наружную поверхность полученных при этом образцов (полых цилиндров) и их торцы подвергали тонкому шлифованию. Остаточные напряжения находили методом Закса [14, 15]. В соответствии с этим методом с внутренней поверхности образцов на указанном станке последовательно удаляли слои металла толщиной 0,7 мм, измеряли возникающие при этом изменения их наружного диаметра и высоты, а затем рассчитывали средние значения окружных, радиальных и осевых остаточных напряжений в удаленных слоях. В каждом эксперименте использовали по два образца.

Измерение диаметров наружной поверхности образцов выполняли на ультраоптиметре фирмы «Carl Zeiss Jena» (ФРГ) с ценой деления 0,0002 мм. Высоту образцов измеряли с помощью микроактора с ценой деления 0,0005 мм, закрепленного в стойке. Схемы измерения размеров образцов показаны на рис. 2. Диаметры наружной

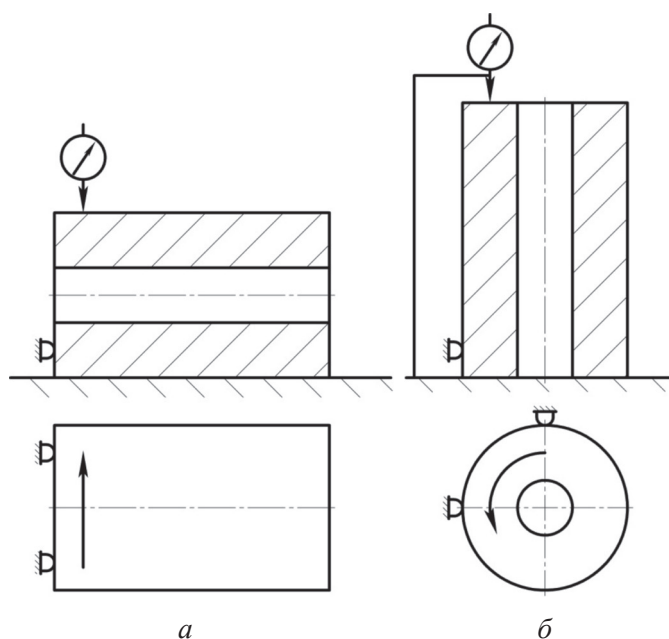


Рис. 2. Схемы измерения:

а – наружного диаметра образца; б – его высоты

поверхности определяли в двух поперечных сечениях образцов, расположенных на расстоянии 5 мм от их торцов. В каждом сечении измерения проводили в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Диаметр наружной поверхности образца принимали равным среднему из четырех значений диаметров, измеренных указанным образом. Высоту образца считали равной средней из двух предельных значений высот, найденных при измерении. Принятые схемы измерения размеров образцов обеспечивали высокую (не ниже 0,0005 мм) точность.

Результаты и обсуждение

На основе экспериментально полученных зависимостей изменения наружного диаметра и высоты образцов от радиуса их внутренней поверхности по формулам И.А. Биргера [14] были рассчитаны остаточные напряжения в них после дорнования по схемам сжатия и растяжения. При расчете принимали модуль упругости $E = 2 \cdot 10^5$ МПа, коэффициент Пуассона $\mu = 0,3$. Расчет остаточных напряжений выполняли с использованием Microsoft Excel 2007.

На рис. 3 сопоставлены остаточные деформации образцов, обработанных дорно-

ванием по схемам сжатия и растяжения. Видно, что при обеих схемах образцы испытывают окружное и осевое растяжение и радиальное сжатие (утонение стенки $\Delta t/t$). При дорновании по схеме растяжения осевая и радиальная остаточные деформации существенно больше, а окружные остаточные деформации на поверхности отверстия и наружной поверхности образцов меньше, чем при дорновании по схеме сжатия.

На рис. 4 показано распределение окружных σ_θ , радиальных σ_r и осевых σ_z остаточных напряжений вдоль радиуса r образцов (эпюры напряжений), обработанных дорнованием по схеме сжатия и растяжения (около средних значений указаны 95-процентные доверительные интервалы). Видно, что характер распределения остаточных напряжений вдоль радиуса образцов при обеих схемах дорнования оказывается одинаковым. Окружные и осевые остаточные напряжения в области, прилегающей к отверстию,

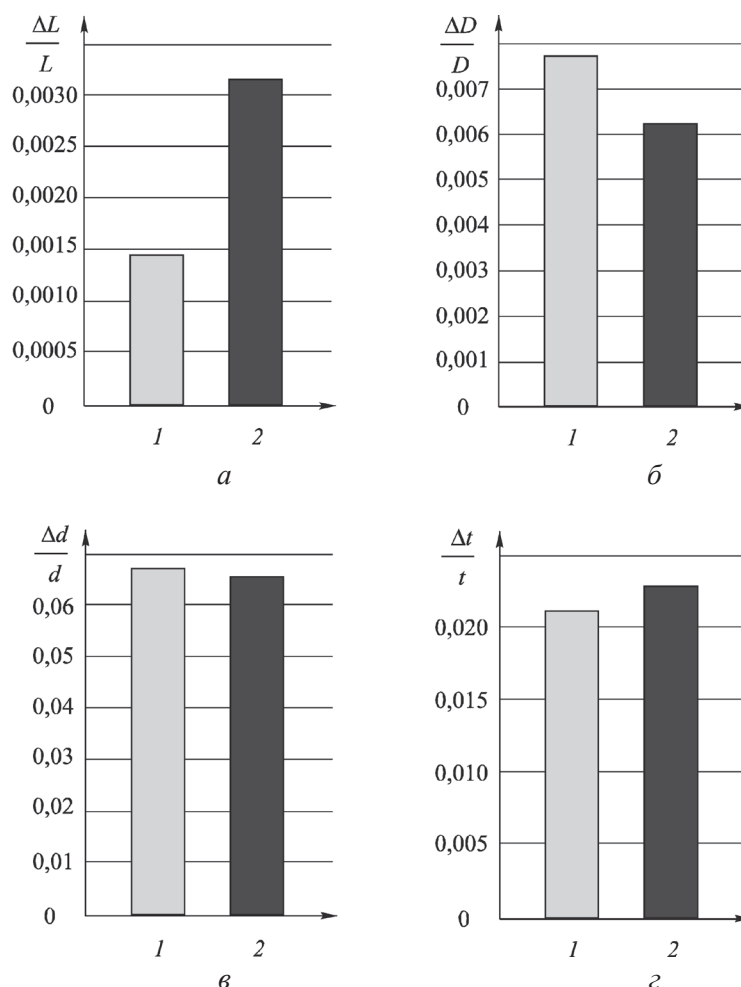


Рис. 3. Остаточные деформации образцов при дорновании по схемам сжатия (1) и растяжения (2):

а – осевые; б, в – окружные соответственно на наружной поверхности и поверхности отверстия; г – радиальные

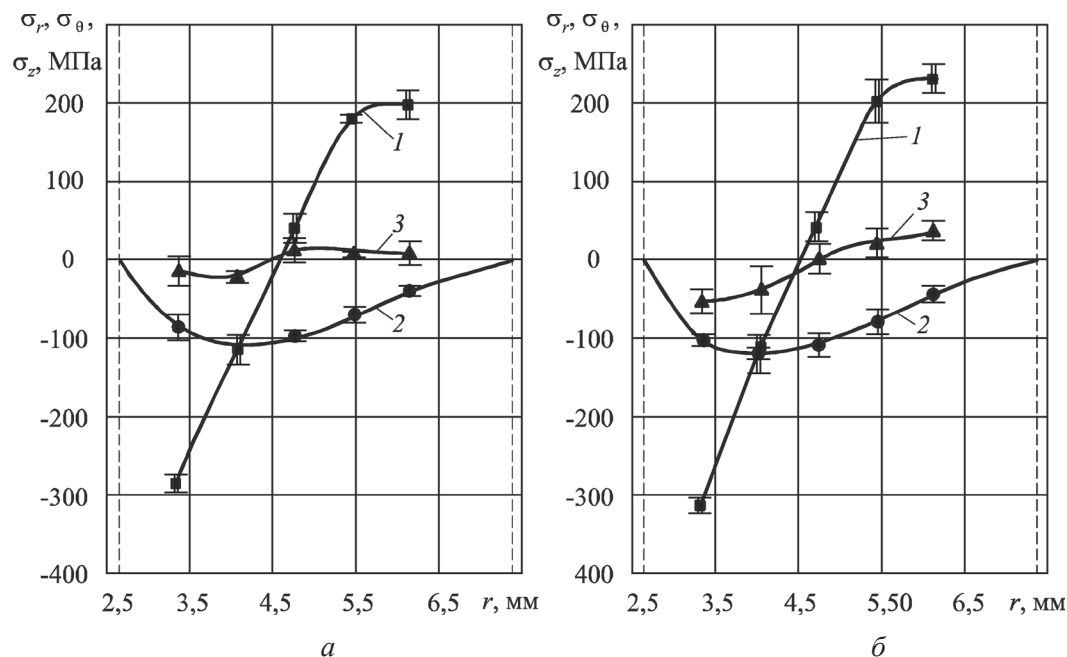


Рис. 4. Эпюры окружных (1), радиальных (2) и осевых (3) остаточных напряжений в образцах после дорнования по схеме сжатия (а) и растяжения (б). Пунктирными линиями показаны поверхности отверстия и наружные поверхности образцов

являются сжимающими, а в области, прилегающей к наружной поверхности, – растягивающими. Радиальные остаточные напряжения равны нулю на поверхности отверстия и наружной поверхности образцов и являются сжимающими в остальной их области. Наибольшими (по абсолютной величине) являются окружные остаточные напряжения, которые у отверстия образцов близки к пределу текучести их материала (стали 45). Значительно меньшими являются радиальные остаточные напряжения и еще меньшими – осевые остаточные напряжения.

Деформированное состояние образцов при дорновании по схеме растяжения (см. рис. 3) обуславливает более высокий уровень остаточных напряжений, чем при дорновании по схеме сжатия. При переходе от схемы сжатия к схеме растяжения наибольшие по абсолютной величине остаточные напряжения в образцах возрастают: окружные с 285 до 320 МПа; радиальные – со 105 до 115 МПа; осевые – с 20 до 60 МПа. То есть при этом окружные и радиальные остаточные напряжения увеличиваются примерно в 1,1 раза, а осевые остаточные напряжения – в 3 раза. Таким образом, наибольшее влияние схема дорнования оказывает на осевые остаточные напряжения в образцах. Однако учитывая, что абсолютная величина этих напряжений мала, в целом влияние схемы дорнования на остаточные напряжения можно считать небольшим.

Выводы

1. При дорновании по схеме растяжения отверстий диаметром 5 мм в толстостенных цилиндрах из стали 45 с натягами, обеспечивающими высокую точность обработки, осевая и радиальная остаточные деформации больше, а окружные остаточные деформации цилиндров меньше, чем при дорновании по схеме сжатия.

2. При переходе от схемы сжатия к схеме растяжения наибольшие по абсолютной величине остаточные напряжения в указанных цилиндрах возрастают: окружные – с 285 до 320 МПа; радиальные – со 105 до 115 МПа; осевые – с 20 до 60 МПа. Характер распределения остаточных напряжений при этом не изменяется.

Список литературы

1. Проскуряков Ю.Г. Дорнование отверстий. – Свердловск: Машгиз, 1961. – 192 с.
2. Проскуряков Ю.Г. Технология упрочняюще-калибрующей и формообразующей обработки металлов. – М.: Машиностроение, 1971. – 208 с.
3. Брондз Л.Д. Технология и обеспечение ресурса самолетов. – М.: Машиностроение, 1986. – 184 с.
4. Розенберг А.М., Розенберг О.А. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания. – Киев: Наукова думка, 1990. – 320 с.

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

6. *Проскуряков Ю.Г., Романов В.Н., Исаев А.Н.* Объемное дорнование отверстий. – М.: Машиностроение, 1984. – 224 с.

7. *Монченко В.П.* Эффективная технология производства полых цилиндров. – М.: Машиностроение, 1980. – 248 с.

8. Остаточные напряжения и точность деталей, обработанных дорнованием / Ю.Г. Проскуряков, А.Н. Исаев, Л.В. Попов, Ф.Ф. Валяев // Вестник машиностроения. – 1973. – № 7. – С. 57–60.

9. Эффективные технологии дорнования, протягивания и деформирующе-режущей обработки / С.К. Амбросимов, А.Н. Афонин, А.Р. Ингеманссон, А.Н. Исаев, А.В. Киричек, Д.В. Крайнев, А.Р. Лебедев, В.Ф. Макаров, А.В. Морозова, П.А. Норченко, Ю.Н. Полянчиков, Д.Л. Соловьев; под ред. А.В. Киричека. – М.: Спектр, 2011. – 328 с.

10. *Охотин И.С., Скворцов В.Ф.* Дорнование глубоких отверстий малого диаметра с большими

натягами. – Германия: LAP LAMBERT Acad. Publ., 2011. – 170 с.

11. *Скворцов В.Ф., Охотин И.С., Арляпов А.Ю.* Остаточные напряжения при дорновании отверстий малого диаметра с большими натягами // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316, № 2. – С. 24–27.

12. Экспериментальная оценка остаточных напряжений, формирующихся в толстостенных заготовках при одноцикловом дорновании с большими натягами / В.Ф. Скворцов, М.Г. Гольдшмидт, М.М. Шульгин, В.С. Федотов // Современные проблемы машиностроения: сб. науч. тр. VII Междунар. науч.-техн. конф., Томск, 11–15 нояб. 2013 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – С. 357–361.

13. *Скворцов В.Ф., Арляпов А.Ю., Охотин И.С.* Дорнование глубоких отверстий малого диаметра // Справочник. Инженерный журнал. Приложение. – 2012. – № 2. – С. 1–24.

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

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

OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 3(64), July – September 2014, Pages 45–50

Residual stresses in compression and tension mandrelling of thick-walled cylinders

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

Tsygankov R.S., Master of Engineering sciences

Boznak A.O., Master's Degree student

Fedotov V.S., Master's Degree student

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

Abstract

The methodology and results of experimental study by Sachs method of residual stresses in thick-walled cylinders of steel grade 45 (0.45% C) with 5 mm diameter hole, outer diameter of 15 mm, height of 50 mm after compression and tension mandrelling, which is performed with allowances that ensure high accuracy of the mandrelled holes are presented in the article.

It is found that the transition from the compression configuration to the tension one increases axial and radial residual strains and reduces hoop residual strains on the surface of the hole and outer surface of the cylinder, and increases the largest in absolute value residual stresses in these areas: hoop stresses – from 285 to 320 MPa; radial stresses – from 105 to 115 MPa; axial stresses – from 20 to 60 MPa.

It is shown that the nature of the residual stress distribution in cylinders does not depend on the mandrelling configuration.

Keywords:

mandrelling, compression and tension configurations, thick-walled cylinders, residual stresses.

References

1. Proskuryakov Yu.G. *Dornovanie otverstii* [Mandrelling holes]. Sverdlovsk, Mashgiz Publ., 1961. 192 p.
2. Proskuryakov Yu.G. *Tekhnologiya uprochnyayushche-kalibruyushchei i formoobrazuyushchei obrabotki metallov* [Technology of strength-calibrating and forming metal]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1971. 208 p.
3. Brondz L.D. *Tekhnologiya i obespechenie resursa samoletov* [Technology and providing resource of aircraft]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1986. 184 p.
4. Rozenberg A.M., Rozenberg O.A. *Mekhanika plasticheskogo deformirovaniya v protsessakh rezaniya i deformiruyushchego protyagivaniya* [Mechanics of plastic deformation in the process of cutting and pulling the deforming]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1990. 320 p.
5. Rozenberg A.M., Rozenberg O.A., Gritsenko E.I., Posvyatenko E.K. *Kachestvo poverkhnosti, obrabotannoi deformiruyushchim protyagivaniem* [Quality of treated surface deforming pulling]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1977. 187 p.
6. Proskuryakov Yu.G., Romanov V.N., Isaev A.N. *Ob "emnoe dornovanie otverstii* [Volume mandrelling holes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 224 p.
7. Monchenko V.P. *Effektivnaya tekhnologiya proizvodstva polykh tsilindrov* [Effective technology for the production of hollow cylinders]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980. 248 p.
8. Proskuryakov Yu.G., Isaev A.N., Popov L.V., Valyaev F.F. *Ostatochnye napryazheniya i tochnost' detalei, obrabotannykh dornovaniem* [Residual stresses and accuracy parts treated mandrelling]. *Vestnik Mashinostroeniya – Russian Engineering Research*, 1973, no. 7, pp. 57-60 (in Russian).
9. Ambrosimov S.K., Afonin A.N., Ingemansson A.R., Isaev A.N., Kirichek A.V., Krainev D.V., Lebedev A.R., Makarov V.F., Morozova A.V., Norchenko P.A., Polyanchikov Yu.N., Solov'ev D.L. *Effektivnye tekhnologii dornovaniya, protyagivaniya i deformiruyushche-rezhushchei obrabotki* [Efficient technologies mandrelling, pulling and cutting-deforming processing]. Moscow, Spektr Publ., 2011. 328 p.
10. 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 Acad. Publ., 2011. 170 p.
11. Skvortsov V.F., Okhotin I.S., Arlyapov A.Yu. *Ostatochnye napryazheniya pri dornovanii otverstii malogo diametra s bol'shimi natyagami* [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 (in Russian).
12. Skvortsov V.F., Gol'dshmidt M.G., Shul'gin M.M., Fedotov V.S. [Experimental evaluation of residual stresses in thick-walled workpieces formed with single-cycle burnishing with big tightness]. *Sbornik nauchnykh trudov VII Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnikeskoi konferentsii "Sovremennye problemy mashinostroeniya"* [Proceedings of the VII International Scientific and Technical Conference "Modern Problems of Engineering"]. Tomsk, TPU Publ., 2013, pp. 357-361.
13. 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.
14. Birger I.A. *Ostatochnye napryazheniya* [Residual Stresses]. Moscow, Mashgiz Publ., 1963. 232 p.
15. Vishnyakov Ya.D., Piskarev V.D. *Upravlenie ostatochnymi napryazheniyami v metallakh i splavakh* [Control residual stresses in metals and alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1989. 254 p.

Received 30 May 2014

Revised 30 June 2014

Accepted 17 July 2014