

# СНИЖЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В ОБРАБАТЫВАЕМЫХ ДОРНОВАНИЕМ ТОЛСТОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРАХ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ИХ ПЛАСТИЧЕСКОГО СЖАТИЯ

**В.Ф. СКВОРЦОВ**, канд. техн. наук, доцент,  
**А.О. БОЗНАК**, аспирант,  
(ТПУ, г. Томск)

Поступила 27 апреля 2016  
Рецензирование 3 мая 2016  
Принята к печати 15 мая 2016

**Бознак А.О.** – 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30,  
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,  
e-mail: aleksey@tpu.ru

На основе анализа литературы высказано предложение, что для снижения остаточных напряжений в обрабатываемых дорнованием с большими натягами толстостенных цилиндрах, при которых пластические деформации в них являются сквозными, и сохранения высокой точности цилиндров необходимо осуществить их осевое пластическое сжатие и последующее дорнование с малыми натягами, при которых в цилиндрах воспроизводится полупругий режим деформирования. Представлены результаты экспериментальных исследований методом Закса окружных, радиальных и осевых остаточных напряжений в цилиндрах из стали 50 (НВ 2170...2290 МПа) с диаметром отверстий  $d = 5$  мм, наружным диаметром  $D = 15$  мм, длиной  $L = 30$  мм, а также точности отверстий цилиндров, выполненных для проверки этого предположения. Установлено, что в цилиндрах, обработанных двухцикловым дорнованием с суммарным натягом  $a_{\Sigma}/d = 5,1\%$ , наибольшие по абсолютной величине окружные остаточные напряжения составляют  $-284$  МПа; после пластического сжатия этих цилиндров с деформациями  $\Delta L/L$  0,5 и 1 % и одноциклового дорнования с натягом  $a/d = 0,9\%$  эти напряжения равны  $-177$  МПа. Показано, что достигнутая при двухцикловом дорновании высокая точность отверстий (IT7) после пластического сжатия цилиндров и одноциклового дорнования полностью сохраняется.

**Ключевые слова:** толстостенные цилиндры, дорнование, пластическое сжатие, остаточные напряжения.  
DOI: 10.17212/1994-6309-2016-2-6-11

## Введение

Дорнование отверстий малого диаметра ( $d \leq 5$  мм) в деталях типа толстостенных цилиндров ( $D/d \geq 2$ ) является одним из наиболее эффективных методов их отделочно-упрочняющей обработки [1–3]. Обладая высокой производительностью, дорнование, выполняемое твердосплавными дорнами с натягами до  $0,1d$  и более, дает возможность повысить точность отверстий с IT11–IT13 до IT7, снизить шероховатость их поверхности с  $Ra = 2$  мкм до  $Ra = 0,1...0,3$  мкм, значительно упрочнить поверхностный слой и

сформировать в нем благоприятные сжимающие остаточные напряжения [4, 5].

Вместе с тем создаваемые при дорновании с большими натягами остаточные напряжения в толстостенных цилиндрах в отдельных случаях могут быть нежелательно высокими. Если при последующей обработке с цилиндров удаляются значительные припуски, то вследствие перераспределения остаточных напряжений они претерпевают существенные деформации и теряют ранее достигнутую точность [6, 7]. Это возможно также из-за релаксации остаточных напряжений в процессе эксплуатации цилиндров [8]. В связи

с изложенным значительный интерес представляет поиск технологических путей снижения этих напряжений.

Основываясь на анализе литературы [1, 9, 10], можно предположить, что одним из таких путей является использование после дорнования с большими натягами осевого пластического сжатия цилиндров с малыми (1...2 %) деформациями и последующего дорнования с малыми (ориентировочно до 1 % от диаметра отверстия) натягами. При сжатии следует ожидать [8, 10, 11], что созданные при дорновании с большими натягами остаточные напряжения резко уменьшатся. Однако при этом неизбежно некоторое снижение достигнутой ранее точности отверстий. Последующее дорнование с малыми натягами, когда в цилиндрах воспроизводится полупругий режим деформирования (их наружная область остается в упругом состоянии), позволит восстановить эту точность и, как показано в работах [1, 9], сформировать остаточные напряжения значительно меньшие, чем при дорновании с большими натягами, при которых имеют место сквозные пластические деформации цилиндров.

Цель работы – экспериментально исследовать возможности снижения остаточных напряжений в обрабатываемых дорнованием с большими натягами толстостенных цилиндрах с использованием пластического сжатия.

### Методика исследования

Эксперименты проводили на образцах из стали 50 (НВ 2170...2290 МПа,  $\sigma_{0,2} \approx 470$  МПа). Диаметр отверстия образцов составлял 5 мм, наружный диаметр – 15 мм, длина – 30 мм. Суть экспериментов состояла в определении остаточных напряжений и анализе точности отверстий образцов после дорнования с большими натягами, пластического сжатия и дорнования с малыми натягами.

Отверстия в образцах получали сверлением спиральным сверлом на токарном станке, затем отверстия разворачивали ручной разверткой. Дорнование отверстий выполняли однозубыми дорнами из твердого сплава ВК8 с углами рабочего и обратного конусов  $6^\circ$  и шириной соединяющей их цилиндрической ленточки 3 мм. Обработку производили на испытательной машине УМЭ-10ТМ с помощью специального

приспособления по схеме сжатия при скорости 0,008 м/с. В качестве смазочного материала применяли жидкость МР-7. Дорнование с большими натягами осуществляли за два цикла, используя дорны диаметром 5,25 и 5,298 мм. Средний суммарный натяг при этом составлял  $a_\Sigma = 0,259$  мм ( $a_\Sigma/d \approx 5,1$  %). Дорнование с малыми натягами производили за один цикл дорном диаметром 5,304 мм. Натяг при этом был  $a = 0,046$  мм ( $a/d \approx 0,9$  %). Пластическое сжатие образцов с деформациями 0,5 и 1% выполняли на ручном механическом прессе с применением специального приспособления. Для исключения перекосов образцов при сжатии предварительно с их торцов плоским шлифованием удаляли возникшие при дорновании наплывы металла, а для снижения трения торцы образцов смазывали смесью жидкости МР-7 с дисульфидом молибдена.

Измерение диаметров отверстий образцов выполняли нутромером фирмы «Carl Zeiss Jena» (ФРГ) с ценой деления 0,002 мм. Измерения проводили в двух продольных и трех поперечных сечениях отверстия (посередине образца и на расстоянии около 2 мм от его торцов). Точность отверстий оценивали по величине рассеивания их диаметров  $\Delta_d = d_{\max} - d_{\min}$ , где  $d_{\max}$ ,  $d_{\min}$  – соответственно максимальный и минимальный диаметры в выборке из пяти образцов. Измерение наружных диаметров и длины образцов осуществляли микрометром МР25 с ценой деления 0,002 мм.

Остаточные напряжения определяли методом Закса [12, 13] с использованием формул И.А. Биргера [12]. При этом применяли методику экспериментов по определению остаточных напряжений, описанную в [14, 15]. В каждом опыте использовали по три образца.

### Результаты и обсуждение

Распределение окружных  $\sigma_\theta$ , радиальных  $\sigma_r$  и осевых  $\sigma_z$  остаточных напряжений вдоль радиуса  $r$  образцов (эпюры напряжений), обработанных дорнованием со средним суммарным натягом  $a_\Sigma/d = 5,1$  %, который вызывает окружную остаточную деформацию на их наружной поверхности  $\Delta D/D = 0,0047$ , являющуюся упруго-пластической, показано на рис. 1.

Видно, что в области, прилегающей к отверстию образцов, окружные и осевые остаточные

напряжения являются сжимающими, которые уравниваются соответствующими растягивающими остаточными напряжениями в наружной области образцов. 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 поверхности отверстия достигают  $-284$  МПа. Рассеивание диаметров отверстий образцов при дорновании с указанными выше натягами уменьшилось с  $0,042$  до  $0,009$  мм (диаметр отверстий после развертывания составлял  $5,018^{+0,042}$  мм, после дорнования  $5,254^{+0,009}$  мм).

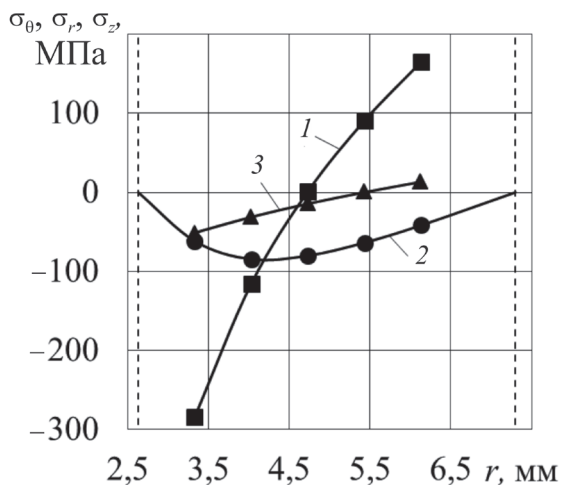


Рис. 1. Эпюры окружных 1, радиальных 2 и осевых 3 остаточных напряжений в образцах после дорнования с натягом  $a_z/d = 5,1$  %. Здесь и ниже пунктирными линиями показаны поверхности отверстия и наружные поверхности образцов

При пластическом сжатии обработанных дорнованием со средним суммарным натягом  $a_z/d = 5,1$  % образцов происходит резкое снижение по абсолютной величине окружных и радиальных остаточных напряжений (рис. 2). При этом характер эпюр остаточных напряжений в значительной степени сохраняется неизменным. При деформации сжатия 0,5 % окружные остаточные напряжения снижаются с  $-284$  МПа (см. рис. 1) до  $-120$  МПа (рис. 2, а), а радиальные с  $-85$  МПа (см. рис. 1) до  $-21$  МПа (см. рис. 2, а). Увеличение деформации сжатия до 1 % (рис. 2, б) приводит к уменьшению окружных остаточных напряжений до  $-75$  МПа, а радиальных

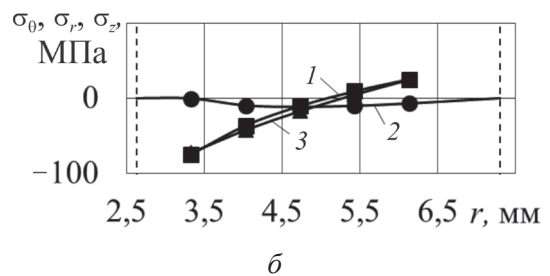
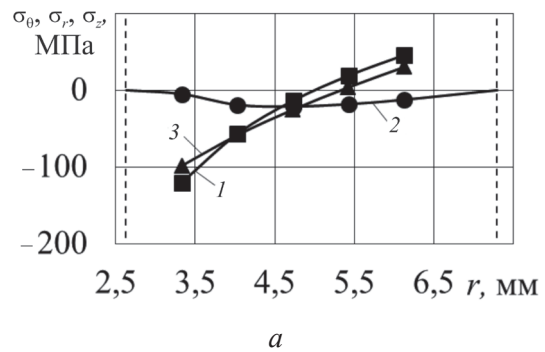
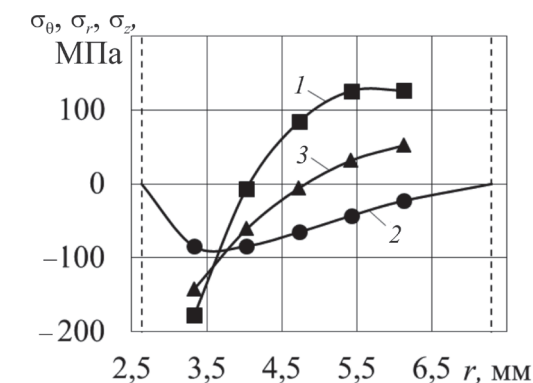


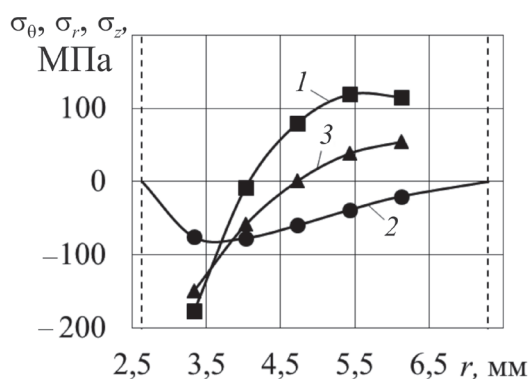
Рис. 2. Эпюры окружных 1, радиальных 2 и осевых 3 остаточных напряжений в образцах после дорнования с натягом  $a_z/d = 5,1$  % и пластического сжатия со степенью деформации 0,5 % (а) и 1 % (б)

до  $-12$  МПа. В то же время при пластическом сжатии заметно увеличиваются осевые остаточные напряжения. Если после дорнования со средним суммарным натягом  $a_z/d = 5,1$  % их наибольшие значения составляют  $-51$  МПа (рис. 1), то после пластического сжатия с деформациями 0,5 и 1 % осевые остаточные напряжения возрастают соответственно до  $-99$  МПа (рис. 2, а) и  $-73$  МПа (рис. 2, б). Такое увеличение, вероятно, обусловлено неоднородностью деформаций образцов при сжатии, вызываемой трением на их торцах. По этой же причине при сжатии снижается точность отверстий образцов. При деформациях сжатия 0,5 и 1 % рассеивание диаметров отверстий образцов соответственно увеличивается с  $0,009$  до  $0,012$  и  $0,015$  мм (диаметр отверстий образцов после сжатия на 0,5 % –  $5,254^{+0,012}$  мм, после сжатия на 1 % –  $5,251^{+0,015}$  мм).

Эпюры остаточных напряжений после дорнования пластически сжатых образцов со средним натягом  $a/d = 0,9$  %, вызывающим окружную остаточную деформацию на их наружной поверхности, равную  $0,00034$ , которая является упругой, показаны на рис. 3. Из него видно, что остаточные напряжения в образцах практически не зависят от степени их пластической дефор-



а



б

Рис. 3. Эпюры окружных 1, радиальных 2 и осевых 3 остаточных напряжений в образцах после дорнования с натягом  $a_{\Sigma}/d = 5,1\%$ , пластического сжатия со степенью деформации 0,5 % (а) и 1 % (б) и дорнования с натягом  $a/d = 0,9\%$

магии при сжатии. Наибольшие по абсолютной величине окружные остаточные напряжения составляют  $-177$  МПа, что в 1,6 раза меньше их значений в образцах, обработанных дорнованием со средним суммарным натягом  $a_{\Sigma}/d = 5,1\%$  (см. рис. 1). Рассевание диаметров отверстий образцов после дорнования с этим натягом не превышало  $0,008$  мм (диаметр отверстий был  $5,27^{+0,008}$  мм).

### Выводы

1. Возникающие при двухцикловом дорновании отверстий в толстостенных цилиндрах из стали 50 (диаметр отверстия 5 мм, наружный диаметр 15 мм, длина 30 мм) с суммарным натягом  $a_{\Sigma}/d = 5,1\%$  наибольшие по абсолютной величине окружные остаточные напряжения, равные  $-284$  МПа, при последующем пластическом сжатии цилиндров со степенями деформаций

0,5 и 1 % и одноцикловом дорновании отверстий с натягом  $a/d = 0,9\%$  снижаются до  $-177$  МПа, т. е. в 1,6 раза.

2. Достигнутая при двухцикловом дорновании высокая точность отверстий (IT7) при этом полностью сохраняется.

### Список литературы

1. Проскураков Ю.Г. Дорнование отверстий. – Свердловск: Машгиз, 1961. – 192 с.
2. Розенберг А.М., Розенберг О.А. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания. – Киев: Наукова думка, 1990. – 320 с.
3. Шнейдер Ю.Г. Технология финишной обработки давлением: справочник. – СПб.: Политехника, 1998. – 414 с.
4. Скворцов В.Ф., Арляпов А.Ю., Охотин И.С. Дорнование глубоких отверстий малого диаметра // Справочник. Инженерный журнал. Приложение. – 2012. – № 2. – С. 1–24.
5. Скворцов В.Ф., Охотин И.С., Арляпов А.Ю. Остаточные напряжения при дорновании отверстий малого диаметра в полых толстостенных цилиндрах с большими натягами // Известия Томского политехнического университета. – 2010. – Т. 316, № 2. – С. 24–27.
6. Остаточные напряжения и точность деталей, обработанных дорнованием / Ю.Г. Проскураков, А.Н. Исаев, Л.В. Попов, Ф.Ф. Валяев // Вестник машиностроения. – 1973. – № 7. – С. 57–60.
7. Проскураков Ю.Г., Романов В.Н., Исаев А.Н. Объемное дорнование отверстий. – М.: Машиностроение, 1984. – 224 с.
8. Вишняков Я.Д., Пискарев В.Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах. – М.: Металлургия, 1989. – 254 с.
9. Проскураков Ю.Г. Технология упрочняюще-калибрующей и формообразующей обработки металлов. – М.: Машиностроение, 1971. – 208 с.
10. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. В 2 ч. Ч. 1. Деформация и разрушение. – М.: Машиностроение, 1974. – 472 с.
11. Алюминий: пер. с англ. / под ред. А.Т. Туманова, Ф.И. Квасова, И.Н. Фридляндера. – М.: Металлургия, 1972. – 664 с.
12. Биргер И.А. Остаточные напряжения. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.
13. Кобрин М.М., Дехтярь Л.И. Определение внутренних напряжений в цилиндрических деталях. – М.: Машиностроение, 1965. – 175 с.
14. Остаточные напряжения при дорновании отверстий в толстостенных цилиндрах по схемам сжатия и растяжения / В.Ф. Скворцов, Р.С. Цыганков,



А.О. Бознак, В.С. Федотов // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2014. – № 3 (64). – С. 45–50.

15. Скворцов В.Ф., Бознак А.О. Влияние длины толстостенных цилиндров на остаточные напряже-

ния, возникающие при одноцикловом дорновании отверстий // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2015. – № 1 (66). – С. 20–26. – doi: 10.17212/1994-6309-2015-1-20-26.

## OBRABOTKA METALLOV

(METAL WORKING AND MATERIAL SCIENCE)

N 2 (71), April – June 2016, Pages 6–11

### The reduction of residual stresses in cold expanded thick-walled cylinders by plastic compression

**Skvortsov V.F.**, Ph.D. (Engineering), Associate Professor

**Boznak A.O.**, Ph.D. student, e-mail: aleksey@tpu.ru

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

#### Abstract

Thick-walled cylinders ( $D/d \geq 2$ ) constitute a large group of parts with precise small diameter holes ( $d = 1 \dots 10$  mm). Improvement of surface finish and accuracy of small diameter holes is an actual task and requires the development of new methods of processing and cold expansion is one of the most effective methods of finishing and hardening of holes in such parts. Along with high productivity, cold expansion helps to increase accuracy, improve surface roughness, considerably work-harden surface layer and generate favorable compressive residual stresses. However, residual stresses generated during cold expansion of parts such as thick-walled cylinders can be undesirably high in some cases.

We suppose that in order to maintain high accuracy of holes and to lower residual stresses after cold expansion of thick-walled cylinders, which undergo throughout plastic deformations, it is needed to perform axial plastic compression with subsequent cold expansion with small interferences. To test the hypothesis, we studied accuracy of holes as well as hoop, radial and axial residual stresses in cylinders made of steel grade 50 (0,5 % C, HB 2170...2290 MPa) with hole diameter  $d = 5$  mm, outer diameter  $D = 15$  and length  $L = 30$  mm by Sachs method. It is found that double-cycle cold expansion with total interference  $a_{\Sigma}/d = 5,1$  % generates hoop residual stresses with largest absolute value equal to 284 MPa, which, after plastic compression with strain  $\Delta L/L$  equal to 0,5 and 1 % and single-cycle cold expansion with interference  $a/d = 0,9$  %, changed to 177 MPa. It is shown that high hole accuracy (IT7) achieved through double-cycle expansion remained at the same high level after plastic compression and single-cycle expansion.

#### Keywords

thick-walled cylinders, cold expansion, plastic compression, residual stresses

DOI: 10.17212/1994-6309-2016-2-6-11

#### References

1. Proskuryakov Yu.G. *Dornovanie otverstii* [Hole mandrelling]. Sverdlovsk, Mashgiz Publ., 1961. 192 p.
2. Rozenberg A.M., Rozenberg O.A. *Mekhanika plasticheskogo deformirovaniya v protsessakh rezaniya i deformiruyushchego protyagivaniya* [Mechanics of plastic deformation in processes of cutting and deforming broaching]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1990. 320 p.
3. Shneider Yu.G. *Tekhnologiya finishnoi obrabotki davleniem: spravochnik* [Finish forming technology: a handbook]. St. Petersburg, Politekhnik Publ., 1998. 414 p.
4. 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, supplement, pp. 1–24.
5. Skvortsov V.F., Okhotin I.S., Arlyapov A.Yu. Ostatechnye napryazheniya pri dornovanii otverstii malogo diametra v polykh tolstostennykh tsilindrakh s bol'shimi natyagami [Residual stresses at pin hole mandrelling in hol-

low thick-walled cylinder with at great tensions]. *Izvestiya Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, vol. 316, no. 2, pp. 24–27. (In Russian)

6. 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 – Soviet Engineering Research*, 1973, no. 7, pp. 57–60. (In Russian)

7. Proskuryakov Yu.G., Romanov V.N., Isaev A.N. *Ob'ёмное дорнование отверстий* [Three-Dimensional mandrelling of holes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 224 p.

8. 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.

9. Proskuryakov Yu.G. *Tekhnologiya uprochnyayushche-kalibruyushchei i formoobrazuyushchei obrabotki metallov* [Technology of work hardening, calibration and forming of metals]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1971. 208 p.

10. Fridman Ya.B. *Mekhanicheskie svoystva metallov*. V 2 ch. Ch. 1. *Deformatsiya i razrushenie* [Mechanical properties of metals. In 2 pt. Pt. 1. Strain and fracture]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1974. 472 p.

11. Tumanov A.T., Kvasov F.I., Fridlyander I.N., eds. *Alyuminii* [Aluminium]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1972. 664 p.

12. Birger I.A. *Ostatochnye napryazheniya* [Residual stresses]. Moscow, Mashgiz Publ., 1963. 232 p.

13. Kobrin M.M., Dekhtyar' L.I. *Opredelenie vnutrennikh napryazhenii v tsilindricheskikh detalyakh* [Determination of internal stress in cylindrical parts]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1965. 175 p.

14. Skvortsov V.F., Tsygankov R.S., Boznak A.O., Fedotov V.S. Ostatochnye napryazheniya pri dornovanii otverstii v tolstostennykh tsilindrakh po skhemam szhatiya i rastyazheniya [Residual stresses in compression and tension mandrelling of thick-walled cylinders]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2014, no. 3 (64), pp. 45–50.

15. Skvortsov V.F., Boznak A.O. Vliyanie dliny tolstostennykh tsilindrov na ostatochnye napryazheniya, vznikayushchie pri odnotsiklovom dornovanii otverstii [The effect of length of thick-walled cylinders on the residual stresses generated during the single-cycle mandrelling]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) – Metal Working and Material Science*, 2015, no. 1 (66), pp. 20–26. doi: 10.17212/1994-6309-2015-1-20-26

#### Article history:

Received 27 April 2016

Revised 3 May 2016

Accepted 15 May 2016