

ВЛИЯНИЕ ДЛИНЫ ТОЛСТОСТЕННЫХ ЦИЛИНДРОВ НА ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ, ВОЗНИКАЮЩИЕ ПРИ ОДНОЦИКЛОВОМ ДОРНОВАНИИ ОТВЕРСТИЙ

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

Поступила 29 января 2015
Рецензирование 10 февраля 2015
Принята к печати 15 февраля 2015

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

Изложена методика и результаты экспериментального исследования методом Закса влияния длины обрабатываемых дорнованием толстостенных цилиндров из стали 50 с диаметром отверстий 5 мм, наружным диаметром 15 и 25 мм на формирующиеся в них остаточные напряжения. На основе анализа литературы отмечено, что это влияние может быть обусловлено как неравномерностью процесса дорнования по длине цилиндра, так и равенством нулю осевых остаточных напряжений на его торцах. Экспериментально установлено, что наиболее сильное влияние длина цилиндров оказывает на осевые остаточные напряжения. При натягах дорнования от 0,9 до 7,1 % с ее уменьшением с 40 до 10 мм наибольшие по абсолютной величине значения этих напряжений снижаются с 210 до 50 МПа. Показано, что при наружном диаметре цилиндров 15 мм их длина существенно сказывается и на окружных и радиальных остаточных напряжениях. При указанном выше уменьшении длины цилиндров окружные и радиальные остаточные напряжения в прилегающей к отверстию области в зависимости от натяга дорнования по абсолютной величине как возрастают (соответственно с –135 до –205 МПа и с –45 до 55 МПа при натяге 7,1 %), снижаются (соответственно с –315 до –235 МПа и с –135 до –95 МПа при натяге 0,9 %), так и сохраняются практически неизменными (при натяге 3,4 %). При наружном диаметре цилиндров 25 мм влияние их длины на окружные и радиальные остаточные напряжения оказывается слабым.

Ключевые слова: дорнование отверстий, длина толстостенных цилиндров, остаточные напряжения.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-1-20-26

Введение

Дорнование является эффективным методом обработки отверстий в деталях типа полых цилиндров [1–3]. Его используют при диаметре отверстий $d = 1 \dots 150$ мм и их относительной глубине $L/d \leq 100$ [4, 5].

Дорнование отверстий сопровождается формированием в полых цилиндрах значительных остаточных напряжений [1, 3, 6]. (Под этими напряжениями далее, как обычно, будем понимать их средние по длине цилиндра значения.)

Остаточные напряжения, как показали исследования [6, 8–10], главным образом определяются натягом и числом циклов дорнования, механическими свойствами материала цилиндров и степенью их толстостенности, характеризуемой отношением D/d (D – наружный диаметр цилиндра). При степени толстостенности цилиндров $D/d \leq 3$ у поверхности отверстия могут формироваться как сжимающие, так и растягивающие окружные остаточные напряжения [6, 8, 11]. Влияние схемы дорнования отверстий в полых цилиндрах (растяжения, сжатия) на остаточные

напряжения является сравнительно слабым [12]. По абсолютной величине остаточные напряжения в обработанных дорнованием полых цилиндрах могут быть близки к пределу текучести $\sigma_{0,2}$ их материала [6, 7]. Установлено [6, 8], что для получения у поверхности отверстия цилиндров благоприятных сжимающих окружных остаточных напряжений, способствующих повышению эксплуатационных свойств цилиндров, последний цикл дорнования необходимо выполнять с малым натягом (около $0,01d$).

Существенное влияние на остаточные напряжения в обработанных дорнованием толстостенных цилиндрах может оказывать их длина. С уменьшением длины цилиндров процесс дорнования становится все менее равномерным, так как все большую долю от этой длины составляет протяженность участков входа и выхода дорна из отверстия, на которых преобладает течение металла в осевом направлении [1, 4]. В связи с этим следует ожидать зависимости всех компонентов остаточных напряжений в обработанных дорнованием цилиндрах от их длины. Кроме того, поскольку на торцах цилиндров осевые остаточные напряжения всегда обращаются в ноль, то с уменьшением длины цилиндров эти напряжения по абсолютной величине снижаются [13, 14]. При этом несколько изменяются и окружные остаточные напряжения [13]. Вместе с тем, как показал анализ указанной выше литературы, экспериментально влияние длины полых цилиндров на формирующиеся в них при дорновании отверстий остаточные напряжения не изучено. Это в известной мере ограничивает применение дорнования при изготовлении полых цилиндров различной длины.

Цель работы – экспериментально исследовать влияние длины толстостенных цилиндров на остаточные напряжения, формирующиеся в них при одноцикловом дорновании отверстий.

Методика исследования

Эксперименты проводили на образцах из стали 50 (НВ 2170...2290 МПа, $\sigma_{0,2} \approx 470$ МПа) с диаметром отверстий $d = 5$ мм. Наружный диаметр образцов D составлял 15 мм ($D/d = 3$) и 25 мм ($D/d = 5$). Длина образцов L была принята равной 10 и 40 мм. Отверстия в них получали сверлением спиральными сверлами на то-

карном станке, затем их развертывали ручными развертками. Дорнование отверстий выполняли на испытательной машине УМЭ-10ТМ с помощью специального приспособления [5] по схеме сжатия. При этом использовали однозубые дорны из твердого сплава ВК8 с углами рабочего и обратного конусов 6° и шириной соединяющей их цилиндрической ленточки 3 мм. Относительные натяги дорнования a/d составляли 0,9; 3,4 и 7,1 %. В качестве смазочного материала при дорновании применяли жидкость МР-7. Скорость дорнования отверстий была равной 0,008 м/с. После дорнования отверстий для обеспечения необходимой точности наружную поверхность образцов и их торцы подвергали тонкому шлифованию. В каждом эксперименте использовали по три образца.

Остаточные напряжения определяли методом Закса [14, 15] с использованием формул И.А. Биргера [14]. В соответствии с этим методом с внутренней поверхности образцов на электроэрозионном проволочно-вырезном станке с ЧПУ модели ДК 7725 (КНР) последовательно удаляли слои металла толщиной не менее 0,7 мм и измеряли возникающие при этом изменения их наружного диаметра и длины. Измерение диаметров наружной поверхности образцов выполняли на ультраоптиметре фирмы «Carl Zeiss Jena» (ФРГ) с ценой деления 0,0002 мм. Длину образцов измеряли с помощью микрометра с ценой деления 0,0005 мм, закрепленного в стойке. Диаметры наружной поверхности образцов длиной 40 мм определяли в трех поперечных сечениях – в среднем по длине и расположенных на расстояниях 2 мм от торцов образцов. У образцов длиной 10 мм диаметры наружной поверхности измеряли только в двух сечениях, отстоящих от их торцов на 2 мм. Диаметр наружной поверхности образца принимали равным среднему из его измеренных значений. Длину образца считали равной средней из ее двух предельных значений, найденных при измерении.

На рис. 1 в качестве примера приведены зависимости изменений наружного диаметра ΔD и длины ΔL образцов ($D=15$ мм) от радиуса их внутренней поверхности (около средних значений указаны 95-процентные доверительные интервалы). Эти и другие аналогичные зависимости (для образцов с $D = 25$ мм) аппроксимировали с помощью программы *Statistica 8* прямыми и по-

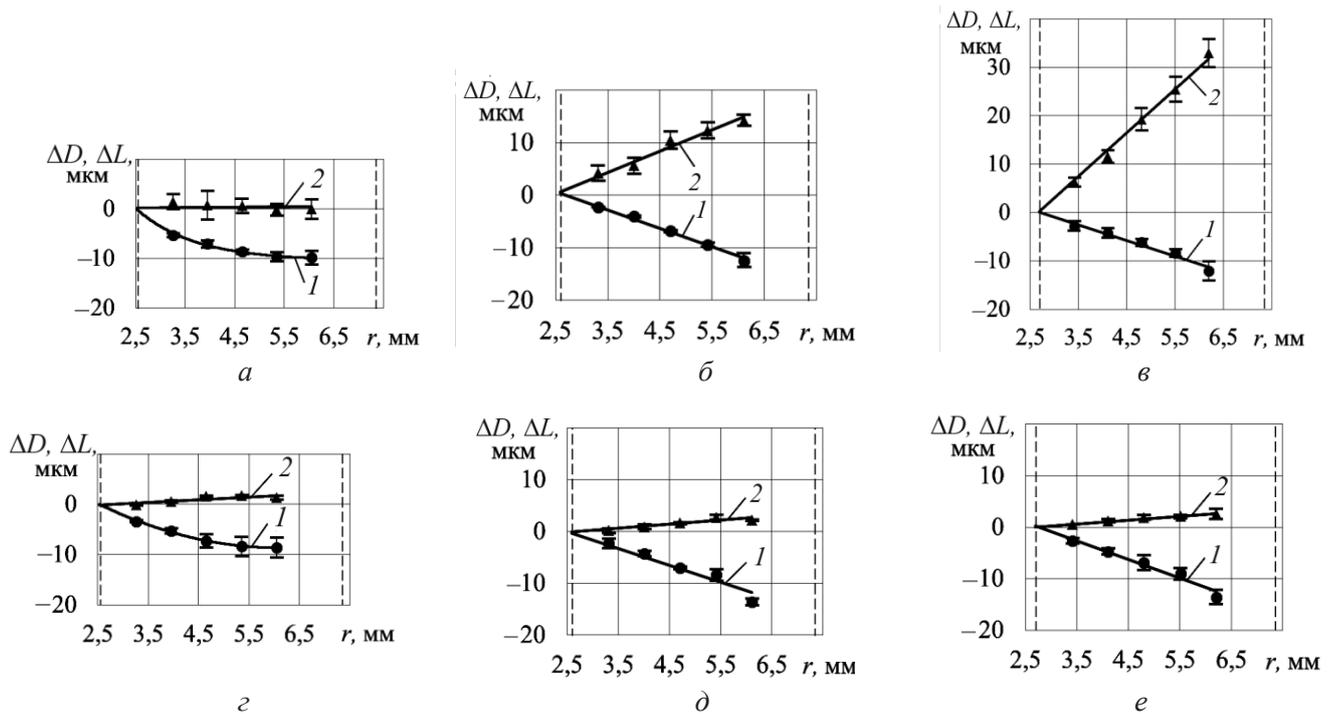


Рис. 1. Зависимости изменения наружного диаметра (1) и длины (2) обработанных дорнованием образцов с $D = 15$ мм от радиуса их внутренней поверхности:

$a - a/d = 0,9 \%$, $L = 40$ мм; $b - a/d = 3,4 \%$, $L = 40$ мм; $в - a/d = 7,1 \%$, $L = 40$ мм; $г - a/d = 0,9 \%$, $L = 0$ мм; $д - a/d = 3,4 \%$, $L = 10$ мм; $e - a/d = ,1 \%$, $L = 10$ мм. Пунктирными линиями показаны поверхности отверстия и наружные поверхности образцов

линомами 2-й степени, уравнения которых затем использовали для расчетов остаточных напряжений. При их проведении принимали модуль упругости $E = 2 \times 10^5$ МПа, коэффициент Пуансона $\mu = 0,3$. Расчеты выполняли с использованием *Microsoft Excel 2013*.

Результаты и обсуждение

Распределение окружных σ_θ , радиальных σ_r и осевых σ_z остаточных напряжений вдоль радиуса r обработанных дорнованием образцов (эпюры напряжений), показано на рис. 2 ($D = 15$ мм) и рис. 3 ($D = 25$ мм). Видно, что во всех исследованных случаях окружные остаточные напряжения у отверстия являются сжимающими, а у наружной поверхности образцов – растягивающими. Радиальные остаточные напряжения равны нулю на поверхности отверстия и наружной поверхности образцов и являются сжимающими в остальной их области. Распределение осевых остаточных напряжений вдоль радиуса образцов является более сложным. В образцах с $D = 15$ мм длиной $L = 40$ мм в области, прилегающей к отверстию, осевые остаточные напряжения при натяге 0,9 % оказываются сжимающими (рис.

2, a), а при натягах 3,4 и 7,1 % – растягивающими (рис. 2, b и $в$). В образцах с $D = 25$ мм в этой области при всех использованных натягах имеют место сжимающие осевые остаточные напряжения (рис. 3). Как видно из рис. 2 и 3, осевые остаточные напряжения у отверстия образцов уравниваются одноименными напряжениями противоположного знака у их наружной поверхности. Наибольшими по абсолютной величине являются окружные остаточные напряжения, которые в образцах с $D = 25$ мм (см. рис. 3) близки к пределу текучести $\sigma_{0,2}$ их материала.

Длина образцов, как показали исследования, наибольшее влияние оказывает на осевые остаточные напряжения. С уменьшением длины образцов обеих степеней толстостенности с 40 до 10 мм осевые остаточные напряжения снижаются по абсолютной величине до значений, не превышающих 50 МПа (рис. 2 и 3). Так, в образцах с $D = 15$ мм, обработанных с натягом 0,9 %, эти напряжения у отверстия изменяются от -135 МПа (рис. 2, a) до -40 МПа (рис. 2, $г$), а обработанных с натягом 7,1 % – с 210 МПа (рис. 2, $в$) до значений, практически равных нулю (рис. 2, e). В образцах с $D = 25$ мм, подвергнутых дорнованию с

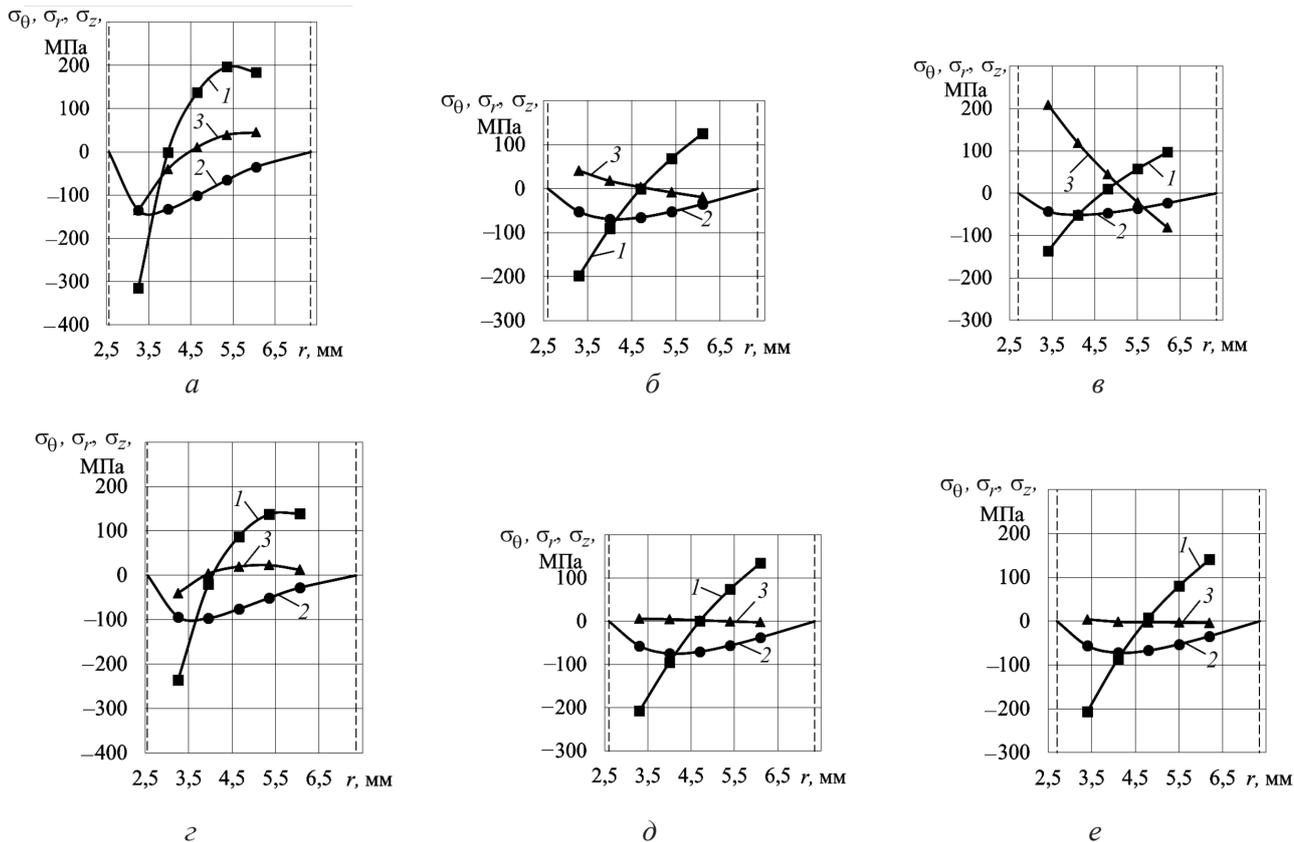


Рис. 2. Эпюры окружных (1), радиальных (2) и осевых (3) остаточных напряжений в обработанных дорнованием образцах с $D = 15$ мм:

$a - a/d = 0,9 \%$, $L = 40$ мм; $b - a/d = 3,4 \%$, $L = 40$ мм; $в - a/d = 7,1 \%$, $L = 40$ мм; $г - a/d = 0,9 \%$, $L = 0$ мм; $д - a/d = 3,4 \%$, $L = 10$ мм; $e - a/d = 7,1 \%$, $L = 10$ мм. Пунктирными линиями показаны поверхности отверстия и наружные поверхности образцов

натягами 3,4 и 7,1 %, осевые остаточные напряжения у отверстия изменяются соответственно с -190 МПа (рис. 3, *a*) до -50 МПа (рис. 3, *в*) и с -75 МПа (рис. 3, *б*) до -10 МПа (рис. 3, *г*).

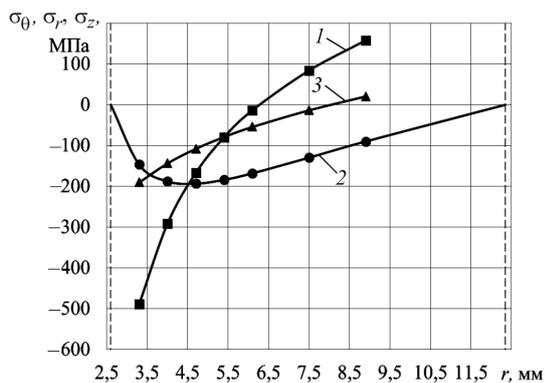
При наружном диаметре образцов $D = 15$ мм их длина заметное влияние оказывает и на окружные и радиальные остаточные напряжения (см. рис. 2). В зависимости от натяга дорнования при уменьшении длины этих образцов с 40 до 10 мм окружные и радиальные остаточные напряжения могут снижаться, возрастать или оставаться практически неизменными. Действительно, при натяге дорнования 0,9 % окружные и радиальные остаточные напряжения у отверстия снижаются по абсолютной величине соответственно с -315 МПа до -235 МПа и с -135 МПа до -95 МПа (рис. 2, *a* и *г*), при натяге дорнования 3,4 % эти напряжения практически не изменяются (рис. 2, *б* и *д*), при натяге дорнования 7,1 % они возрастают по абсолютной величине соответственно с -135 МПа до -205 МПа и с -45 МПа до -55 МПа (рис. 2, *в* и *е*).

Влияние длины образцов с наружным диаметром $D = 25$ мм на окружные и радиальные остаточные напряжения оказывается слабым (см. рис. 3).

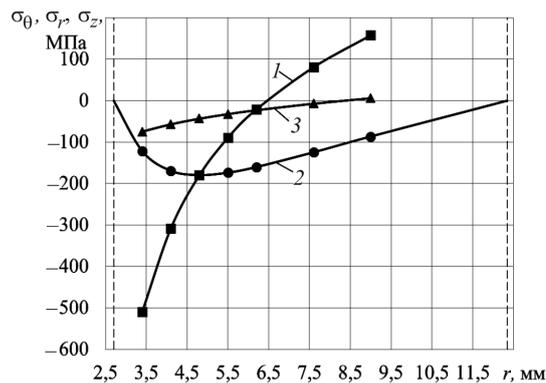
Выводы

1. Наиболее сильное влияние длина обрабатываемых дорнованием полых цилиндров оказывает на осевые остаточные напряжения. При уменьшении длины цилиндров из стали 50 (диаметр отверстия 5 мм, наружный диаметр 15 и 25 мм, натяги дорнования от 0,9 до 7,1 %) с 40 до 10 мм наибольшие по абсолютной величине значения осевых остаточных напряжений снижаются с 210 до 50 МПа.

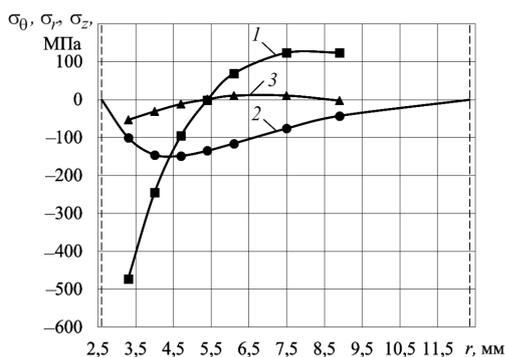
2. При наружном диаметре цилиндров 15 мм их длина существенно сказывается и на окружных и радиальных остаточных напряжениях. При указанном выше уменьшении длины цилиндров окружные и радиальные остаточные напряжения у отверстия в зависимости от натяга дорнования по абсолютной величине как воз-



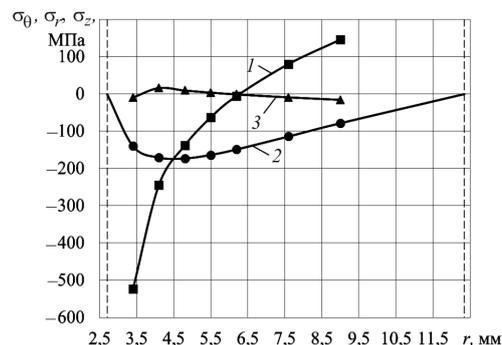
а



б



в



г

Рис. 3. Эпюры окружных (1), радиальных (2) и осевых (3) остаточных напряжений в обработанных дорнованием образцах с $D = 25$ мм:

а – $a/d = 3,4$ %, $L = 40$ мм; б – $a/d = 7,1$ %, $L = 40$ мм; в – $a/d = 3,4$ %, $L = 10$ мм; г – $a/d = 7,1$ %, $L = 10$ мм
 Пунктирными линиями показаны поверхности отверстия и наружные поверхности образцов

растают (соответственно с -135 до -205 МПа и с -45 до 55 МПа при натяге $7,1$ %), снижаются (соответственно с -315 до -235 МПа и с -135 до -95 МПа при натяге $0,9$ %), так и сохраняются практически неизменными (при натяге $3,4$ %). Влияние длины образцов с наружным диаметром 25 мм на эти напряжения является слабым.

Список литературы

1. Проскуряков Ю.Г. Дорнование отверстий. – Свердловск: Машгиз, 1961. – 192 с.
2. Справочник технолога-машиностроителя: в 2 т.: т. 2 / под ред. А.М. Дальского, А.Г. Сулова, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова. – М.: Машиностроение-1, 2003. – 943 с.
3. Монченко В.П. Эффективная технология производства полых цилиндров. – М.: Машиностроение, 1980. – 248 с.
4. Розенберг А.М., Розенберг О.А. Механика пластического деформирования в процессах резания и деформирующего протягивания. – Киев: Наукова думка, 1990. – 320 с.

5. Скворцов В.Ф., Арляпов А.Ю., Охотин И.С. Дорнование глубоких отверстий малого диаметра // Справочник. Инженерный журнал. Приложение. – 2012. – № 2. – С. 1–24.
6. Качество поверхности, обработанной деформирующим протягиванием / А.М. Розенберг, О.А. Розенберг, Э.И. Гриценко, Э.К. Посвятенко. – Киев: Наукова думка, 1977. – 187 с.
7. Проскуряков Ю.Г., Романов В.Н., Исаев А.Н. Объемное дорнование отверстий. – М.: Машиностроение, 1984. – 224 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. – 327 с.
10. 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.

11. 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: сборник научных трудов VII Международной научно-технической конференции, г. Томск, 11–13 ноября 2013 г. – Томск: Изд-во ТПУ, 2013. – С. 357–361.

12. Остаточные напряжения при дорновании отверстий в толстостенных цилиндрах по схемам сжа-

тия 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.

13. Кобрин М.М., Дехтярь Л.И. Определение внутренних напряжений в цилиндрических деталях. – М.: Машиностроение, 1965. – 175 с.

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 1(66), January – March 2015, Pages 20–26

The effect of length of thick-walled cylinders on the residual stresses generated during the single-cycle mandrelling

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

Boznak A.O., Ph.D. student, e-mail: boznakao@gmail.com

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

Abstract

The methodology and results of experimental study by Sachs method of the effect of length of mandrelled thick-walled steel (0.5 % C) cylinders with inner diameter of 5 mm, outer diameter of 15 and 25 mm on residual stresses are studied. It is shown that such effect can take place both due to the uneven process of mandrelling along the cylinder length, and due to zero axial residual stresses on its ends. It is found that the length of cylinders has the strongest influence on axial residual stresses. With allowances between 1.9 and 13,7 % and length reduction from 40 to 10 mm, the largest absolute value of axial residual stresses decreases from 210 to 50 MPa. It is noted that when the outer diameter of cylinders is 15 mm its length significantly influence on both hoop and radial residual stresses. With the above-mentioned reduction in cylinders length, absolute values of hoop and radial residual stress in the region adjacent to the hole, depending on the mandrelling allowance, can increase (from -135 to -205 MPa and from -45 to 55 MPa respectively with 7,1 % allowance), decrease (from -315 to -235 MPa and from -135 to -95 MPa respectively with 0.9 % allowance) and remain almost unchanged (with 3,4 % allowance). The effect of length on these stresses is weak when the outer diameter of cylinders is 25 mm.

Keywords:

mandrelling, length of thick-walled cylinders, residual stresses.

DOI: 10.17212/1994-6309-2015-1-20-26

References

1. Proskuryakov Yu.G. *Dornovanie otverstii* [Mandrelling holes]. Sverdlovsk, Mashgiz Publ., 1961. 192 p.
2. Dal'skii A.M., Suslov A.G., Kosilova A.G., Meshcheryakov R.K. *Spravochnik tekhnologa-mashinostroitelya*. V 2 t. T. 2. [The handbook of technologist-machine engineer. In 2 vol. Vol. 2]. 5th ed., corrected. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2003. 943 p.
3. Monchenko V.P. *Effektivnaya tekhnologiya proizvodstva polykh tsilindrov* [Effective technology for the production of hollow cylinders]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1980. 248 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. 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.
6. 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.
7. Proskuryakov Yu.G., Romanov V.N., Isaev A.N. *Ob "emnoe dornovanie otverstii* [Volume mandrelling holes]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1984. 224 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* [Effective technologies of burnishing, stretching and deforming-cutting machining]. Moscow, Spektr Publ., 2011. 327 p.
10. Skvortsov V.F., Okhotin I.S., Arlyapov A.Yu. Ostatochnye napryazheniya pri dornovanii otverstii malogo diametra s bol'shimi natyagami [Residual stresses at pin hole mandrelling in hollow thick-walled cylinder with at great tensions]. *Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta – Bulletin of the Tomsk Polytechnic University*, 2010, Vol. 316, no. 2, pp. 24–27. (In Russian)
11. 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-tekhnicheskoi konferentsii "Sovremennye problemy mashinostroeniya"* [Proceedings of the VII International Scientific and Technical Conference "Modern Problems of Engineering"]. Tomsk, TPU Publ., 2013, pp. 357–361.
12. 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.
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. 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 29 January 2015

Revised 10 February 2015

Accepted 15 February 2015