

РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИ ДОРНОВАНИИ С УЧЕТОМ ПОВТОРНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ

П.Г. Мазеин¹, А.Е. Токарев²

¹Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия

²ООО «Завод энергоэффективного и емкостного оборудования», г. Челябинск, Россия

В статье обоснована необходимость учета повторного деформирования при технологической операции дорнования или деформирующего протягивания, приведены экспериментальные распределения остаточных напряжений при дорновании. Представлено моделирование остаточных напряжений в полом толстостенном цилиндре при дорновании с учетом вторичных деформаций и повторного деформирования. Рассмотрены области, в которых прошли пластическое нагружение и упругая разгрузка, упругое нагружение и упругая разгрузка; приведены примеры моделирования окружных остаточных напряжений, т. е. результаты расчетного определения окружных остаточных напряжений в полом цилиндре по приведенным математическим моделям. Даны рекомендации по назначению количества дорнующих колец на дорнующем инструменте: их для формирования нужного распределения остаточных напряжений в приповерхностном слое достаточно двух, третье кольцо обеспечивает шероховатость. Рассмотрены особенности распределения окружных сжимающих остаточных напряжений в зонах вторичных и повторных деформаций; повторные деформации проявляются в приповерхностном слое, прилежащем к обработанной поверхности, т. е. остаточные напряжения от повторного деформирования накладываются на вторичные остаточные напряжения. Сформулированы подробные выводы по влиянию на остаточные напряжения в приповерхностном слое изменений давления (натяга) при дорновании, изменений толщины стенки цилиндра и изменений предела текучести обрабатываемого материала. Результаты моделирования не противоречат экспериментальным данным.

Ключевые слова: остаточные напряжения, дорнование, повторные деформации.

Введение

Распределение остаточных напряжений в поверхностном слое деталей машин характеризует её качества [1–3]. Одним из способов формирования остаточных напряжений в поверхностном слое деталей является дорнование с помощью дорнов или деформирующих протяжек (рис. 1) [4–6].

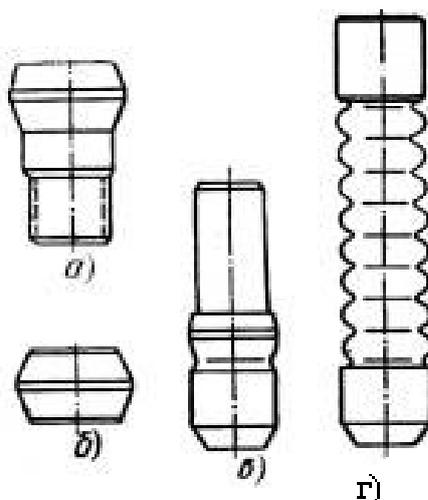


Рис. 1. Дорнующие кольца на дорне или хвостовике протяжки

Экспериментально выявлены следующие характерные варианты распределения остаточных напряжений, сформированных при дорновании (рис. 2).

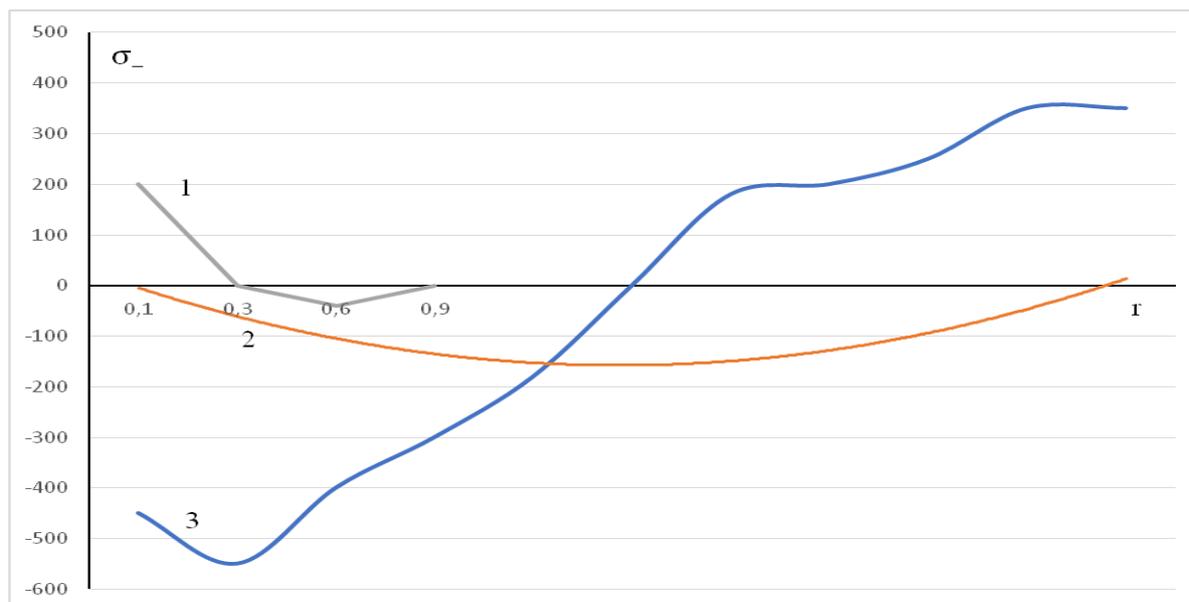


Рис. 2. Экспериментальные распределения остаточных напряжений: 1 – экспериментальные остаточные окружные напряжения; 2 – экспериментальные радиальные остаточные напряжения; 3 – экспериментальные окружные остаточные напряжения при средних натягах; σ – величина напряжения, МПа, r – расчетный радиус, мм

При больших натягах на обработанной поверхности формируются растягивающие напряжения, переходящие при удалении от поверхности в сжимающие; при малых натягах максимальные сжимающие напряжения – на поверхности, при «средних» натягах максимальные сжимающие напряжения смещены от поверхности. Изменение сжимающих остаточных напряжений при удалении от поверхности при «средних» натягах (натяг – разность радиусов дорнующего кольца и отверстия заготовки) объясняют особенностями пластического деформирования, влиянием температуры при обработке [6–8] и др., однако при этом математические модели и расчетные методики, описывающие предлагаемые объяснения, не приводятся.

Моделирование

Расчетные методы прогнозирования окружных остаточных напряжений выявили, что при малых натягах максимальные сжимающие напряжения формируются на поверхности, затем они с удалением от поверхности увеличиваются и переходят в растягивающие [7, 9–12]. В практике дорнования применяется от одного до трех дорнующих колец, причем первое кольцо обеспечивает $1/3$ величины натяга, второе кольцо $3/4$ величины натяга, третье кольцо применяется для обеспечения заданной шероховатости [12–16]. Необходимо выяснить для технологического применения, какое количество дорнующих колец необходимо для формирования нужного распределения остаточных напряжений в приповерхностном слое деталей.

В работе Мазеина [17], основывающейся на работах Москвитина [18, 19] показано, что расчет остаточных напряжений, адекватных экспериментальным, возможен лишь с учетом вторичных пластических деформаций в деформируемом полой толстостенном цилиндре [17]. Смещение максимума сжимающихся остаточных напряжений в приповерхностном слое вглубь при «средних» натягах объясняется наличием вторичных пластических деформаций.

Необходимо расчетное обоснование необходимости применения второго дорнующего кольца, так как третье кольцо обеспечивает только шероховатость.

Для ответа на этот вопрос необходимо решить задачу о повторных пластических деформациях.

Для решения задачи можно использовать работы Москвитина [18,19]. Рассмотрим, в соответствии с [18], моделирование воздействия равномерного внутреннего давления на полой цилиндр при повторном деформировании, т. е. при последовательном деформировании цилиндра двумя дорнующими кольцами:

$$\sigma_i'' = \sigma_i - \bar{\sigma}_i + \tilde{\sigma}_i, \quad (i = r, \theta, z), \quad (1)$$

где σ_i – остаточные напряжения при упругом деформировании;

$\bar{\sigma}_i$ – остаточные напряжения при упруго-пластическом деформировании;

$\tilde{\sigma}_i$ – остаточные напряжения при пластическом деформировании.

Для определения значений компонентов σ_i воспользуемся формулами [18]:

1. При $a \leq r \leq r_s$

$$\sigma'_r = -p' + \frac{2 \times \lambda \times \sigma_s}{\sqrt{3}} \times \ln \frac{r}{a} + \frac{1-\lambda}{\sqrt{3}} \times \sigma_s \times \frac{r^2-a^2}{a^2} \times \frac{r_s^2}{r^2}, \quad (2)$$

$$\sigma'_\theta = \sigma'_r + \frac{2 \times \lambda \times \sigma_s}{\sqrt{3}} + \frac{2}{\sqrt{3}} \times (1-\lambda) \times \sigma_s \times \frac{r_s^2}{r^2}, \quad (3)$$

$$\sigma'_z = \sigma'_r + \frac{\lambda \times \sigma_s}{\sqrt{3}} + \frac{1}{\sqrt{3}} \times (1-\lambda) \times \sigma_s \times \frac{r_s^2}{r^2}. \quad (4)$$

где r_s – радиус цилиндрической поверхности отделяющей области упругих и пластических деформаций; $\sigma_{r'}$ – радиальные остаточные напряжения; $\sigma_{\theta'}$ – окружные остаточные напряжения; $\sigma_{z'}$ – осевые остаточные напряжения; σ_s – предел текучести; a – внутренний радиус цилиндра; r – расчетный радиус; p' – давление, оказываемое на стенку цилиндра; λ , t_3 и t_2 – коэффициенты, отражающие характеристики материала при многоцикловом нагружении и разгрузке.

2. При $r_s \leq r \leq b$

$$\sigma'_r = -\frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \times \frac{b^2-r^2}{b^2} \times \frac{r_s^2}{r^2}, \quad (5)$$

$$\sigma'_\theta = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \times \frac{b^2+r^2}{b^2} \times \frac{r_s^2}{r^2}.$$

Для определения компонентов σ_i необходимо воспользоваться формулами:

1. При $a \leq r \leq r_0$

$$\bar{\sigma}_r = -p' + \frac{4 \times \lambda \times \sigma_s}{\sqrt{3}} \times \ln \frac{r}{a} + \frac{2}{\sqrt{3}} \times (1-\lambda) \times \sigma_s \times \frac{r^2-a^2}{a^2} \times \frac{r_0^2}{r^2}, \quad (6)$$

$$\bar{\sigma}_\theta = \bar{\sigma}_r + \frac{4 \times \lambda \times \sigma_s}{\sqrt{3}} + \frac{4}{\sqrt{3}} \times (1-\lambda) \times \sigma_s \times \frac{r_0^2}{r^2}.$$

2. При $r_0 \leq r \leq b$

$$\bar{\sigma}_r = -\frac{2 \times \sigma_s}{\sqrt{3}} \times \frac{b^2-r^2}{b^2} \times \frac{r_0^2}{r^2},$$

$$\bar{\sigma}_\theta = \frac{2 \times \sigma_s}{\sqrt{3}} \times \frac{b^2+r^2}{b^2} \times \frac{r_0^2}{r^2}.$$

Для определения значения компонента $\tilde{\sigma}_i$ воспользуемся формулами:

1. При $a \leq r \leq r_s$

$$\sigma'_r = -p'' + \frac{2 \times \lambda \times (t_3+t_2) \times \sigma_s}{\sqrt{3}} \times \ln \frac{r}{a} + \frac{1-\lambda}{\sqrt{3}} \times (t_3+t_2) \times \sigma_s \times \frac{r^2-a^2}{a^2} \times \frac{r_s^2}{r^2}, \quad (7)$$

$$\sigma'_\theta = \sigma'_r + \frac{2 \times \lambda \times (t_3+t_2) \times \sigma_s}{\sqrt{3}} + \frac{2}{\sqrt{3}} \times (1-\lambda) \times (t_3+t_2) \times \sigma_s \times \frac{r_s^2}{r^2},$$

$$\sigma'_z = \sigma'_r + \frac{\lambda \times (t_3+t_2) \times \sigma_s}{\sqrt{3}} + \frac{1}{\sqrt{3}} \times (1-\lambda) \times (t_3+t_2) \times \sigma_s \times \frac{r_s^2}{r^2}.$$

2. При $r_s \leq r \leq b$

$$\sigma'_r = -\frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \times \frac{b^2-r^2}{b^2} \times \frac{r_s^2}{r^2}$$

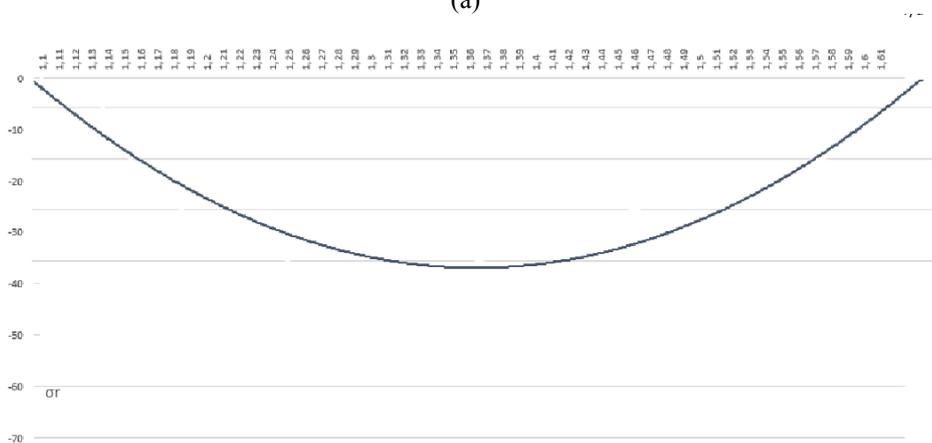
$$\sigma'_\theta = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} \times \frac{b^2+r^2}{b^2} \times \frac{r_s^2}{r^2}.$$

Математические модели по (1)–(7) реализованы в MS Excel при: $\lambda = 0,97$; $t_3 = 0,02$; $t_2 = 0,01$; $a = 10$ мм; $b = 21$ мм; σ_s (МПа) = 225. В результате расчета получены следующие эпюры (рис. 3, 4).

На расчетных эпюрах (рис. 3, 4) зона проявления вторичных пластических деформаций находится глубже зоны повторных деформаций, причем максимальные повторные остаточные сжимающие напряжения более значительны, чем значения вторичных остаточных напряжений. На рис. 4 видно, что при увеличении давления увеличиваются максимальные значения сжимающих остаточных напряжений, при этом влияние повторных деформаций (зона до $r/a = 1,14$) увеличивается.



(а)



(б)

Рис. 3. Расчетное распределение окружных (а) и радиальных (б) остаточных напряжений по толщине стенки цилиндра: 1 – при давлении 50 МПа, повторном 70 МПа, 2 – при давлении 70 МПа, повторном 90 МПа, 3 – при давлении 90 МПа, повторном 120 МПа

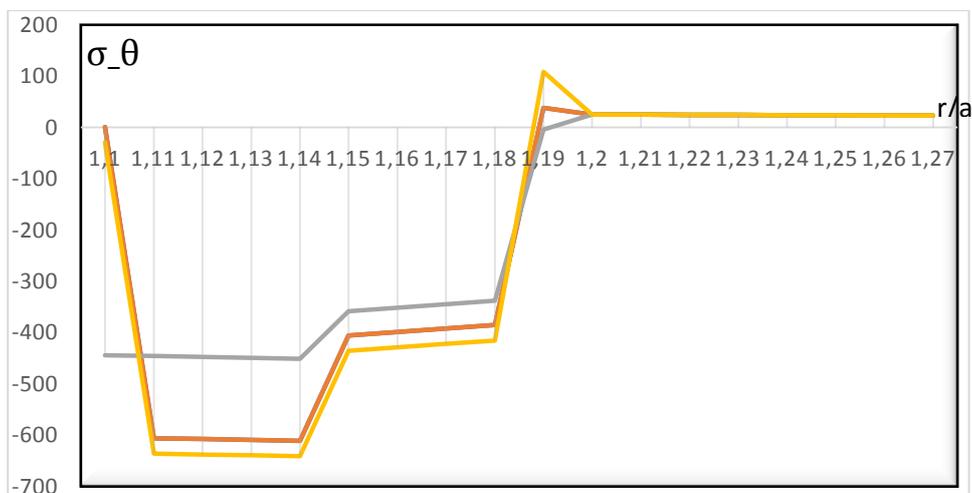


Рис. 4. Расчетное распределение окружных остаточных напряжений в приповерхностном слое: 1 – при давлении 50 МПа, повторном 70 МПа, 2 – при давлении 70 МПа, повторном 90 МПа, 3 – при давлении 90 МПа, повторном 120 МПа

На рис. 5 показаны распределения окружных остаточных напряжений при изменении толщины стенки, а на рис. 6 – при изменении предела текучести обрабатываемого материала.

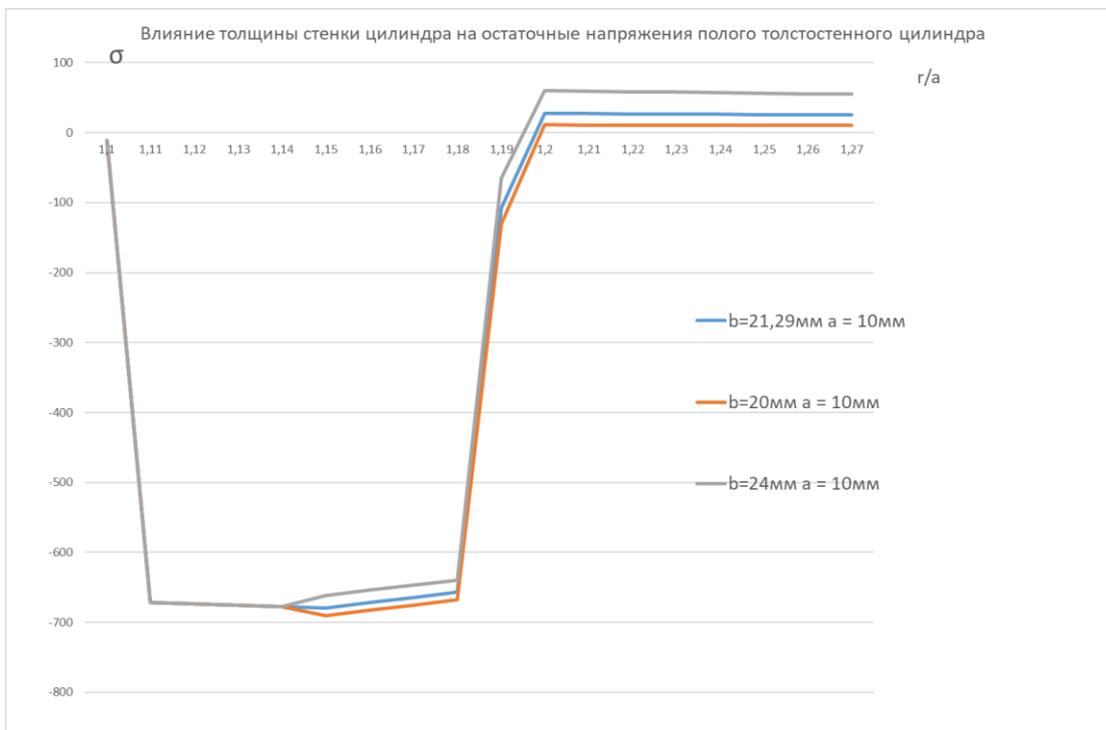


Рис. 5. Расчетное распределение окружных остаточных напряжений в приповерхностном слое при изменении толщины стенки цилиндра

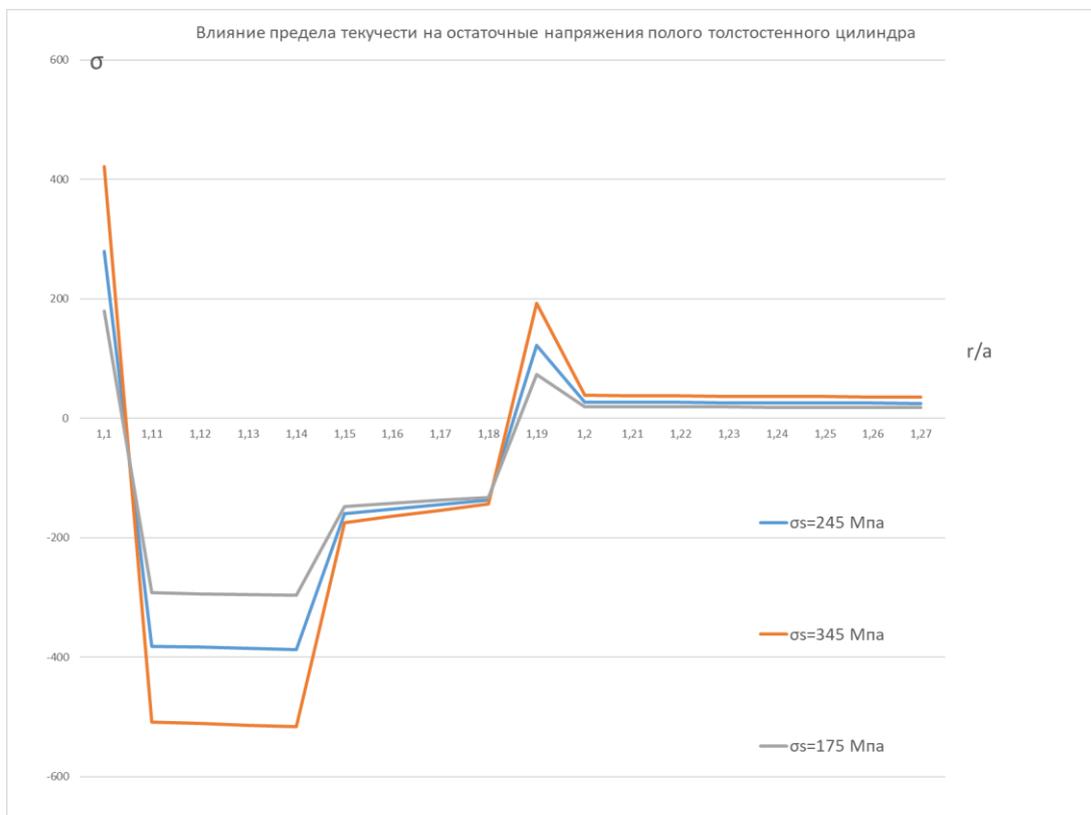


Рис. 6. Расчетное распределение окружных остаточных напряжений в приповерхностном слое при изменении предела текучести обрабатываемого материала

Обсуждение результатов

На всех расчетных эпюрах (см. рис. 3–6) видно, что влияние повторного деформирования проявляется в прилегающей к обрабатываемой поверхности зоне. Влияние повторного деформирования на окружные остаточные напряжения проявляется в приповерхностном упрочненном слое: сжимающие напряжения проявляются, снижаясь (на 1/3 для средних натягов) в области удаленной от обрабатываемой поверхности, меньше, чем область влияния вторичных пластических деформаций (см. рис. 3–6). При больших натягах влияние повторного деформирования значительнее, уменьшение максимальных значений сжимающих напряжений несущественно, а глубина их спада находится глубже влияния вторичных пластических деформаций. Результаты моделирования соответствуют экспериментальным результатам. Увеличение предела текучести повышает влияние повторных пластических деформаций (см. рис. 6).

Расчет остаточных напряжений при других давлениях (см. рис. 4) дает аналогичные распределения остаточных напряжений, величина особенностей распределения остаточных напряжений в деформируемом поверхностном слое зависит от отношения внутреннего и наружного радиусов цилиндра и свойств материала цилиндра, что соответствует выводам работы [9].

Выводы

Разработанная математическая модель (5)–(7) остаточных напряжений с учетом вторичных и повторных пластических деформаций при дорновании полых толстостенных цилиндров:

1) является основой методики выбора параметров дорна в зависимости от требуемого распределения остаточных напряжений в поверхностном слое;

2) позволяет через расчет пластических и упругих деформаций при обработке определять точность размеров отверстия с учетом разброса размеров отверстий партии заготовок под дорнование;

3) подтверждает выявленную экспериментально необходимость применения двух деформирующих колец на дорне:

3.1) с увеличением давления (натяга от первого кольца и натяга от второго кольца) (см. рис. 3, 4):

3.1.1) влияние повторного деформирования увеличивается, уменьшение сжимающих напряжений менее значительно, а глубина их спада находится глубже влияния вторичных пластических деформаций;

3.1.2) увеличивается максимум сжимающих окружных остаточных напряжений;

3.1.3) увеличивается толщина слоя со сжимающими окружными остаточными напряжениями;

3.1.4) влияние повторных деформаций уменьшается;

3.2) с увеличением толщины стенки полого цилиндра (см. рис. 5)

3.2.1.) влияние повторного деформирования и глубина спада сжимающих напряжений больше влияния вторичных пластических деформаций. Это объясняется краевыми условиями возникновения остаточных напряжений полого толстостенного цилиндра,

3.2.2) увеличивается толщина слоя со сжимающими остаточными напряжениями,

3.2.3) влияние повторных деформаций уменьшается;

3.3) с увеличением предела текучести (см. рис. 6)

3.3.1) увеличиваются сжимающие остаточные напряжения, влияние повторных пластических деформаций проявляется глубже вторичных из-за низкого значения σ_s относительно давления,

3.3.2) максимум сжимающих остаточных напряжений сначала увеличивается, потом уменьшается,

3.3.3) толщина сжатого слоя практически не изменяется,

3.3.4) влияние повторных деформаций вначале увеличивается, потом уменьшается.

Литература

1. Кудрявцев, И.В. Внутренние напряжения как резерв прочности в машиностроении / И.В. Кудрявцев. – М.: Машигиз, 1951. – 277 с.

2. Анализ видов упрочняющей обработки пластическим деформированием / В.А. Голенков, С.Ю. Радченко, Д.О. Дорохов, И.М. Грядун // *Фундаментальные проблемы техники и технологии*. – 2011. – № 1 (285) – С. 59–62.

3. К вопросу о повышении эксплуатационных характеристик полых осесимметричных деталей машин методами интенсивной пластической деформации / В.А. Голенков, С.Ю. Радченко, Д.О. Дорохов, И.М. Грядунюв // *Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии*. – 2012. – № 6 (296). – С. 71–77.
4. Каратушин, С.И. Остаточные напряжения в цилиндрических изделиях / С.И. Каратушин, Д.В. Спиридонов, Ю.А. Плешанова // *Металловедение и термическая обработка металлов*. – 2013. – № 6. – С. 53–56.
5. Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах / Г.Н. Чернышев, А.Л. Попов, В.М. Козинцев, И.И. Пономарев. – М.: Наука, 1996. – 240 с.
6. Розенберг, О.А. Технологическая механика деформирующего протягивания / О.А. Розенберг, Ю.А. Цеханов, С.Е. Шейкин. – Воронеж; ВГТА, 2001. – 203 с.
7. Кузнецов, В.А. Повышение эффективности деформирующего протягивания за счет геометрии инструмента / В.А. Кузнецов, Т.Д. Тимофеева // *Материалы международной научно-технической конференции ААИ «Автомобиле- и тракторостроение в России: приоритеты развития и подготовка кадров», посвященной 145-летию МГТУ «МАМИ», 2010.*
8. Смирнов-Аляев, Г.А. Экспериментальные исследования в обработке металлов давлением / Г.А. Смирнов-Аляев, В.П. Чикидовский. – Л.: Машиностроение, 1972. – С. 211–242.
9. Process lubricant for deforming broaching of pieces made of titanium / S.E. Sheikin, E.A. Paschenko, I.Yu. Rostotsky et al. // *Metallurgical and Mining Industry*. – 2014. – Vol. 6(2). – С. 56–66.
10. Forming of a gradient nanostructure on a surface of details by the method of plastic deformation / O.A. Rozenberg, N.V. Novikov, S.Ye. Shejkin et al. // *Metallophysics and Advanced Technologies*. – 2004. – Vol. 26. – P. 1493–1500.
11. Биргер, И.А. Остаточные напряжения / И.А. Биргер. – М.: Машигиз, 1983. – 232 с.
12. Позднякова, И.В. Износостойкость и остаточные напряжения при дорновании / И.В. Позднякова // *Труды совещания по упрочнению деталей машин*. – М.: Наука, 1965. – С. 142–150.
13. Проскураков, Ю.Г. Дорнование отверстий / Ю.Г. Проскураков. – Машигиз, 1961. – 192 с.
14. Товпенец, Е.С. Остаточные тангенциальные напряжения в полых стальных цилиндрах, наклепанных изнутри / Е.С. Товпенец, П.С. Сахаров // *Металлургия*. – 1936. – № 2. – С. 36–42.
15. Проскураков, Ю.Г. Остаточные напряжения в деталях, обработанных дорнованием / Ю.Г. Проскураков, И.В. Позднякова // *Современные способы и технологии обработки деталей упрочняющее-калибрующими инструментами*. – Челябинск: ЧПИ, 1961. – С. 37–48.
16. Проскураков, Ю.Г. Остаточные напряжения и точность деталей, обработанных дорнованием / Ю.Г. Проскураков // *Вестник машиностроения*. – 1973. – № 7. – С. 58–60.
17. Мазеин, П.Г. Моделирование формирования остаточных напряжений и деформаций при поверхностном пластическом деформировании стальных деталей: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / П.Г. Мазеин. – Челябинск, 1994. – 413 с.
18. Москвитин, В.В. Упруго-пластические деформации при повторных нагружениях: автореферат дис. ... д-ра физ.-мат. наук / В.В. Москвитин. – М.: Ин-т механики Акад. наук СССР, 1960. – 15 с.
19. Москвитин, В.В. Пластичность при переменных нагружениях / В.В. Москвитин. – М.: МГУ, 1965. – 263 с.
20. Klink, U. Honen von Kleinstbohrungen / U. Klink, G. Flores // *Werkzeug-Technologie*. – 2003. – V. 37. – № 1. – P. 26–32.
21. Okhotin, I. Burnishing of deep holes of small diameter with large strains / I. Okhotin, V. Skvortsov / LAP Lambert Academic Publishing, 2011. – 180 с.
22. De Swardt, R.R. Finite element simulation of the Sachs boring method of measuring residual stresses in thick-walled cylinders / R.R. De Swardt // *Journal of pressure vessel technology*. – 2003. – V. 125. – № 3. – P. 274–276.
23. Ekmekci, B. A semi-empirical approach for residual stresses in electric discharge machining (EDM) / B. Ekmekci, A.E. Tekkaya, A. Erden // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2006. – V. 46. – № 7. – P. 858–868.

24. Koc, M. Prediction of residual stresses in quenched aluminum blocks and their reduction through cold working processes / M. Koc, J. Culp, T. Altan // *Journal of materials processing technology*. – 2006. – V. 174. – № 1. – P. 342–354.

25. Lai, M.O. Residual stress field of ballised holes / M.O. Lai, Z. He // *Journal of mechanical science and technology*. – 2012. – V. 26. – № 5. – P. 1555–1565.

26. Parker, A.P. A critical examination of Sachs' material-removal method for determination of residual stress / A.P. Parker // *Pressure Vessels and Piping Conference. American Society of Mechanical Engineers*, 2003. – P. 1–4.

27. Methods of measuring residual stresses in components / N.S. Rossini, M. Dassisti, K.Y. Benyounis, A.G. Olabi // *Materials & Design*. – 2012. – V. 35. – P. 572–588

Мазин Петр Германович, профессор кафедры «Технологии автоматизированного машиностроения», Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, mpg2@mail.ru.

Токарев Андрей Евгеньевич, начальник проектно-конструкторского отдела, ООО «Завод энергоэффективного и емкостного оборудования», г. Челябинск duha71@yandex.ru.

Поступила в редакцию 13 апреля 2020 г.

DOI: 10.14529/engin200204

CALCULATION OF RESIDUAL STRESSES FROM BURNISHING TAKING REPEATED DEFORMATIONS INTO ACCOUNT

P.G. Mazein¹, mpg2@mail.ru,

A.E. Tokarev², shronlb@mail.ru

¹South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,

²LLC "Plant of energy-efficient and capacitive equipment", Chelyabinsk, Russian Federation

It is shown that the introduction of CNC grinding machines requires a constant assessment of the state of the technological system taking into account the dynamics of the process based on automatic control of the machining process.

The article substantiates the necessity of taking repeated deformation into account during the technological operation of burnishing (deforming broaching), and the experimental distributions of the residual stresses during burnishing are presented. In order for designers to have the right to set residual stress requirements on drawings, technologists must be able to form them and, therefore, model them. A simulation of residual stresses in a hollow thick-walled cylinder during burnishing which takes into account secondary deformations and re-deformation is presented and areas with plastic loading and elastic unloading or elastic loading and elastic unloading are examined. Examples of modeling residual stresses and the results of the calculated determination of the circumferential residual stresses in a hollow cylinder according to mathematical models are given; recommendations are given in this connection on the appointment of a number of burnishing rings on the burnishing tool; it is shown that two are sufficient to form the necessary distribution of residual stresses in the surface layer, and a third ring provides roughness. The features of distribution of circumferential compressive residual stresses in the areas of secondary and repeated deformations are considered; repeated deformations appear in the near-surface layer adjacent to the treated surface, i.e. the residual stresses from the repeated deformation are superimposed on the secondary residual stresses. Detailed conclusions on the effect on residual stresses in the near-surface layer of pressure changes (interference) during burnishing, the changes in the wall thickness of the cylinder, and changes in the yield strength of the processed material\$ simulation results don't contradict experimental data.

Keywords: residual stresses, burnishing, repeated deformations.

References

1. Kudryavtsev I.V. *Vnutrenniye napryazheniya kak rezerv prochnosti v mashinostroyenii* [Internal Stresses as a Safety Margin in Mechanical Engineering]. Moscow, Mashgiz, 1951, 277 p.
2. Golenkov V.A., Radchenko S.Yu., Dorokhov D.O., Gryadunov I.M. [Analysis of the Types of Hardening Treatment by Plastic Deformation]. *Fundamental and Applied Problems of Technics and technology*. 2011. no. 1(285). pp. 59–62 (in Russ)
3. Golenkov V.A., Radchenko S.Yu., Dorokhov D.O., Gryadunov I.M. [On the Issue of Improving the Operational Characteristics of Hollow Axisymmetric Machine Parts by Methods of Intensive Plastic Deformation] *Fundamental and Applied Problems of Technics and technology*. 2012. no. 6 (296). pp. 71–77. (in Russ)
4. Karatushin S.I., Spiridonov D.V., Pleshanova Yu.A. [Residual stresses in cylindrical products]. *Metal Science and Heat Treatment*. 2013. No. 6. Pp. 53–56. (in Russ)
5. Chernyshev G.N., Popov A.L., Kozintsev V.M., Ponomarev I.I. *Ostatochnyye napryazheniya v deformiruyemykh tverdykh telakh* [Residual Stresses in Deformable Solids]. Moscow, Science, 1996, 240 p.
6. Rosenberg O.A., Tsekhanov Yu.A., Sheikin S.E. *Tekhnologicheskaya mekhanika deformiruyushchego protyagivaniya* [Technological Mechanics of Deforming Pulling]. Voronezh. VGTA Publ., 2001. 203 p.
7. Kuznetsov V.A., Timofeeva T.D. [Improving the Efficiency of Deforming Pulling due to the Geometry of the Tool]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-tekhnicheskoy konferentsii AAI «Avtomobile- i traktorostroyeniye v Rossii: priority razvitiya i podgotovka kadrov», posvyashchennoy 145-letiyu MGTU «MAMI»* [Materials of the International Scientific and Technical Conference of the Automobile and Automotive Engineering and Tractor Engineering in Russia: Development Priorities and Personnel Training, dedicated to the 145th anniversary of MSTU MAMI], 2010.
8. Smirnov-Alyaev G.A., Chikidovsky V.P. *Eksperimental'nyye issledovaniya v obrabotke metallov davleniyem* [Experimental Studies in the Processing of Metals by Pressure]. Leningrad, Mashinostroyeniye. 1972. pp. 211–242
9. Sheikin S.E., Paschenko E.A., Rostotsky I.Yu., Gavrilova V.S., Protsishin V.T. Process Lubricant for Deforming Broaching of Pieces Made of Titanium. *Metallurgical and Mining Industry*, 2014. vol. 6(2). pp. 56–66
10. Rozenberg O.A., Novikov N.V., Shejkin S.Ye, Firstov S., Podrezov Yu., Danylenko M. Forming of a Gradient Nanostructure on a Surface of Details by the Method of Plastic Deformation. *Metallophysics and Advanced Technologies*. 2004. vol. 26. pp. 1493-1500.
11. Birger I.A. *Ostatochnyye napryazheniya* [Residual stresses]. Moscow. Mashgiz, 1983. 232 p.
12. Pozdnyakova I.V. [Wear resistance and residual stresses during burnishing]. *Trudy soveshchaniya po uprochneniyu detaley mashin. Moskva. Nauka* [Proceedings of the meeting on hardening machine parts. Moscow. The Science], 1965. Pp.142–150.
13. Proskuryakov Yu.G. *Dornovaniye otverstiy* [Hole Burning]. Moscow. Mashgiz, 1961. 192 p.
14. Tovpenets E.S., Sakharov P.S. *Ostatochnyye tangentsial'nyye napryazheniya v polykh stal'nykh tsilindrakh, naklepennykh iznutri* [Residual Tangential Stresses in Hollow Steel Cylinders Riveted from the Inside]. *Metallurgy*, 1936, no. 2. pp. 36–42.
15. Proskuryakov Yu.G., Pozdnyakova I.V. [Residual Stresses in Burnished Parts]. *Sovremennyye sposoby i tekhnologii obrabotki detaley uprochnyayushcheye-kalibruyushchimi instrumentami. Chelyabinsk. CHPI* [Modern Methods and Technologies for Processing Parts Reinforcing-Calibrating Tools. Chelyabinsk. CPI], 1961. Pp. 37–48.
16. Proskuryakov Yu.G. [Residual Stresses and Accuracy of Burnished Parts]. *Bulletin of mechanical engineering*. 1973. No. 7. Pp. 58–60. (in Russ)
17. Mazein P.G. *Modelirovaniye formirovaniya ostatochnykh napryazheniy i deformatsiy pri poverkhnostnom plasticheskom deformirovanii stal'nykh detaley dissertatsiya na soiskaniye uchenoy stepeni doktora tekhnicheskikh nauk*. [Modeling of the Formation of Residual Stresses and Strains During Surface Plastic Deformation of Steel Parts the Dissertation for the Degree of Doctor of Technical Sciences] Chelyabinsk. ChPI, 1994. 413 p.
18. Moskvitin V.V. *Uprugo-plasticheskaya deformatsiya tel pri povtornykh nagruzheniyyakh avtoreferat dis. na soiskaniye uchenoy stepeni doktora fiziko-matematicheskikh nauk* [Elastic-Plastic

Deformation of Bodies Under Repeated Loading Abstract for the Degree of Doctor of Physical and Mathematical Sciences]. Moscow. Institute of Mechanics Acad. USSR sciences, 1960. 15 p.

19. Moskvitin V.V. *Plastichnost' pri peremennykh nagruzheniyakh* [Plasticity under Variable Loads]. Moscow State University Publ. 1965. 263 p.

20. Klink U., Flores G. Honen von Kleinstbohrungen. *Werkzeug-Technologie*. 2003, vol.37, no. 1, pp. 26–32.

21. Okhotin I., Skvortsov V. Burnishing of Deep Holes of Small Diameter with Large Strains. *LAP Lambert Academic Publishing*, 2011, 180 p.

22. De Swardt R. R. Finite Element Simulation of the Sachs Boring Method of Measuring Residual Stresses In Thick-Walled Cylinders. *Journal of pressure vessel technology*. 2003, vol. 125, no. 3, pp. 274–276.

23. Ekmekci B., Tekkaya A. E., Erden A. A Semi-Empirical Approach for Residual Stresses in Electric Discharge Machining (EDM). *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2006, vol 46, no. 7, pp. 858–868.

24. Koc M., Culp J., Altan T. Prediction of Residual Stresses in Quenched Aluminum Blocks and Their Reduction Through Cold Working Processes. *Journal of Materials Processing Technology*. 2006, vol. 174, no. 1, pp. 342–354.

25. Lai M.O., He Z. Residual Stress Field of Ballised Holes. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2012, vol. 26, no 5, pp. 1555– 1565. DOI: 10.1007/s12206-012-0326-6

26. Parker A.P. A Critical Examination of Sachs' Material-Removal Method for Determination of Residual Stress. *Pressure Vessels and Piping Conference. American Society of Mechanical Engineers*, 2003, pp. 1–4.

27. Rossini N.S., Dassisti M., Benyounis K.Y., Olabi A.G. Methods of Measuring Residual Stresses in Components. *Materials & Design*. 2012, vol. 35, pp. 572–588.

Received 13 April 2020

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Мазин, П.Г. Синтез системы автоматического управления глубиной резания круглошлифовального станка / В.Б. Богущкий, Л.Б. Шрон // Вестник ЮУрГУ. Серия «Машиностроение». – 2020. – Т. 20, № 2. – С. 37–46. DOI: 10.14529/engin200204

FOR CITATION

Mazin P.G., Tokarev A.E. Calculation of Residual Stresses from Burnishing Taking Repeated Deformations into Account *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Mechanical Engineering Industry*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 37–46. (in Russ.) DOI: 10.14529/engin200204