

УДК 621.774.37:539.319

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-103-108>

РЕЛАКСАЦИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ И ТОЧНОСТЬ ТРУБНЫХ МЕТАЛЛОИЗДЕЛИЙ

Колмогоров Г.Л.¹, Кузнецова Е.В.¹, Хабарова Д.В.¹¹Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Россия

Аннотация

Исследование закономерностей формирования остаточных напряжений при холодном пластическом деформировании применительно к осесимметричным металлоизделиям. При исследовании остаточных напряжений предложена методика расчета технологических остаточных напряжений, формируемых в процессе пластического деформирования при изготовлении осесимметричных трубных металлоизделий, учитывающая степень пластической деформации, и основные параметры технологического процесса, а также механических свойств обрабатываемого материала. На основе энергетического подхода решена задача определения остаточных напряжений в осесимметричных заготовках в зависимости от основных технологических параметров процесса пластического деформирования. Решения получены в аналитическом виде. В выражения для определения остаточных напряжений входят основные параметры процесса обработки, механические свойства материала и геометрические характеристики изделия. Наличие аналитических соотношений для определения остаточных напряжений позволяет прогнозировать поведение металлоизделий в условиях эксплуатационных нагрузок и предотвращать их разрушение. Напряжения и деформации, возникающие в процессе эксплуатации деталей, изменяются во времени, даже в случае, когда нагрузки остаются постоянными. Оценивается влияние последеформационной релаксации последеформационных остаточных напряжений на геометрические характеристики трубных металлоизделий. Значение величины остаточных напряжений позволяет прогнозировать поведение металлоизделий в условиях эксплуатационных нагрузок и предотвращать их разрушение. Актуальность проблемы определения остаточных напряжений заключается в том, что они могут играть как положительную, так и отрицательную роль в эксплуатационных свойствах металлоизделий в процессе их последующей эксплуатации. Теоретическое определение остаточных напряжений требует решения достаточно сложной связанной задачи термоупругопластичности, необходимости решения задачи механики твердого деформируемого тела, число таких решений применительно к технологическим процессам весьма ограничено как в отечественных изданиях, так и в зарубежных.

Ключевые слова: технологические остаточные напряжения, осесимметричные металлоизделия, степень пластической деформации, релаксация напряжений, точность трубных металлоизделий.

Введение

Технологические остаточные напряжения определяют качество и эксплуатационные характеристики металлопродукции [1]. Существующие методики определения остаточных напряжений носят в основном экспериментальный характер, не обладают универсальностью, применение их зачастую затруднено и приводит к значительным погрешностям. Остаточные напряжения в металлоизделиях могут достигать значительных величин вплоть до предела текучести и прочности материала, что зачастую приводит к разрушению конструкций еще при хранении или в первые часы эксплуатации при достаточно низком уровне эксплуатационных нагрузок. Уровень остаточных напряжений является во многих случаях важным параметром, определяющим качество изделий, полученных в результате пластического деформирования методами обработки давлением.

Теория и методы исследования

В работе предложена методика определения технологических остаточных напряжений при пластическом деформировании труб на основе энергетического подхода. Сущность энергетического подхода заключается в том, что потенциальная энергия остаточных напряжений U рассматривается как часть энергии U_d , пошедшей на пластическое деформирование [2]:

$$U_0 = \psi U_d, \quad (1)$$

где ψ – параметр, определяющий долю энергии пластического деформирования, пошедшую на формирование остаточных напряжений.

Величина энергии пластического деформирования определяется соотношением

$$U_d = S_{ceq} \int_0^{\varepsilon} \sigma_s d\varepsilon, \quad (2)$$

© Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В., Хабарова Д.В., 2018

где $S_{сеч}$ – площадь сечения металлоизделия; σ_s – сопротивление деформации материала металлоизделия; ε – степень пластической деформации при производстве металлоизделия.

Технологические остаточные напряжения носят упругий характер, поэтому они определяются из решения упругой задачи для конкретной конфигурации металлоизделия. При этом используется математический аппарат теории упругости.

Так, потенциальная энергия упругих остаточных напряжений равна [3]

$$U_0 = \frac{1}{2} \int_V \sigma_{ij} \varepsilon_{ij} dV, \quad (3)$$

где σ_{ij} – компоненты тензора остаточных напряжений; ε_{ij} – компоненты тензора упругих деформаций от действия остаточных напряжений; V – объем изделия.

При производстве осесимметричных изделий после деформирования под действием остаточных напряжений реализуется схема плоского упругого деформированного состояния. Характерным для этой схемы является отсутствие осевых деформаций ($\varepsilon_z = 0$). Система дифференциальных уравнений для упругого состояния, соответствующего действию остаточных напряжений, в цилиндрической системе координат имеет вид [3]:

$$\left. \begin{aligned} r \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rz}) &= 0; \\ \frac{\partial}{\partial r} (r \partial_r) - \sigma_\theta + r \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

где $\sigma_\theta, \sigma_r, \sigma_z$ – окружные, радиальные и осевые напряжения соответственно.

При осевой симметрии напряженного состояния в условиях плоского деформированного состояния имеем $\frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = 0, \frac{\partial \tau_{rz}}{\partial z} = 0$, тогда система уравнений (4) принимает вид

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial}{\partial r} (r \tau_{rz}) &= 0; \\ \frac{\partial}{\partial r} (r \sigma_r) - \sigma_\theta &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Уравнения (5) не содержат осевого напряжения σ_z , которое определяется дополнительным

соотношением из обобщенного закона Гука

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \mu(\sigma_r + \sigma_\theta)] = 0,$$

откуда следует

$$\sigma_z = \mu(\sigma_r + \sigma_\theta), \quad (6)$$

Здесь μ и E – коэффициент Пуассона и модуль упругости материала соответственно.

Уравнения (5) и (6) определяют упругое состояние осесимметричного тела при наличии остаточных напряжений.

Разрешив первое из уравнений относительно τ_{rz} , получим

$$\tau_{rz} = \frac{C_1}{r}. \quad (7)$$

Как допущение, полагаем $\tau_{rz} = 0$. Продифференцировав выражение в круглых скобках уравнения (6), имеем

$$\sigma_\theta = \sigma_r + r \frac{d\sigma_r}{dr}. \quad (8)$$

После подстановки данного соотношения во второе уравнение системы (5) и преобразований получим [4]

$$\frac{d\sigma_r}{dr} + \frac{2\sigma_r}{r} - \frac{\sigma_z}{\mu r} = 0. \quad (9)$$

Уравнение (9) применим для оценки напряженного состояния от остаточных напряжений для трубных металлоизделий с внешним радиусом R_1 и внутренним радиусом R_2 .

Границные условия для радиальных остаточных напряжений имеют следующий вид:

$$\sigma_{r=r_1} = 0, \sigma_{r=r_2} = 0. \quad (10)$$

С учетом вышеприведенных граничных условий можно записать выражение для σ_r в виде

$$\sigma_r = -a_0(R_1 - r)(r - R_2), \quad (11)$$

где a_0 – неизвестная постоянная, характеризующая распределение и величину остаточных напряжений, знак минус в выражении (10) указывает, что радиальные остаточные напряжения являются сжимающими [1].

При определении окружного остаточного напряжения используется второе уравнение системы (5) с учетом уравнения (9).

После интегрирования и преобразований получим

$$\sigma_\theta = a_0 [(r - R_1)(r - R_2) + r(2r - R_1 - R_2)]. \quad (12)$$

Учитывая соотношения (6), (11) и (12), получим выражение для определения осевых остаточных напряжений

$$\sigma_z = a_0 \mu [2(r - R_1)(r - R_2) + r(2r - R_1 - R_2)]. \quad (13)$$

При этом условие самоуравновешиваемости продольных остаточных напряжений

$$\int_0^{2\pi} \int_{R_1}^{R_2} \sigma_z r dr d\theta = 0 \quad (14)$$

выполняется автоматически.

Зная компоненты тензора напряжений σ_{ij} (11–13) в трубных металлоизделиях, в соответствии с соотношением (3) можно определить потенциальную энергию упругой деформации в объеме трубы единичной длины

$$U_0 = \frac{\pi a_0^2}{120E} R_1^6 (1 - \mu^2) B (1 - \bar{R}^2), \quad (15)$$

где $B = 7(1 - \bar{R}^6) - 18\bar{R}(1 - \bar{R}^4) + 15\bar{R}^4$ – безразмерный параметр, характеризующий геометрию трубы;

$\bar{R} = R_2 / R_1$ – безразмерный параметр, характеризующий толщину стенки трубы.

Энергия пластического деформирования при производстве трубы волочением с учетом (2) примет вид

$$U_\delta = \pi (R_1^2 - R_2^2) \sigma_{s_cp} \varepsilon, \quad (16)$$

где σ_{s_cp} – среднее значение сопротивления деформации материала трубы;

ε – степень пластической деформации при производстве трубного металлоизделия.

После подстановки соотношений (15) и (16) в энергетическое условие (1), преобразований получим значение параметра a_0 :

$$a_0 = \frac{\sigma_{s_cp}}{R_1^2} \sqrt{\frac{60\psi^*}{(1 - \mu^2)B} \varepsilon}, \quad (17)$$

где $\psi^* = \psi E / \sigma_s$ – комплексный параметр деформативности, характеризующий механические свойства деформируемого металла [5].

Определив a_0 из соотношения (17), в соответствии с уравнениями (12) – (17) находим напряженное состояние трубного металлоизделия от последеформационных остаточных напряжений.

Степень пластической деформации при волочении труб предложено определять [5] в виде

$$\varepsilon = \ln \frac{d_0}{d_1} + \frac{4 \operatorname{tg} \alpha_b (1 - \bar{R}^3)}{3 \sqrt{3(1 - \bar{R}^2)}}, \quad (18)$$

где d_0, d_1 – средние диаметры трубной заготовки до и после деформации; α_b – угол наклона образующей волочильного инструмента к оси волочения; $a = R_2 / R_1$ – параметр, характеризующий геометрию трубного металлоизделия.

Известно, что напряжения и деформации, возникающие в процессе эксплуатации деталей, изменяются во времени даже в случае, когда нагрузки остаются постоянными. Изменение во времени деформаций называют ползучестью, изменение напряжений во времени называют релаксацией [7].

Данные явления связаны между собой и характерны для упруго-вязких сред. Проявление таких свойств характерно для большинства конструкционных материалов, особенно при действии высоких нагрузок и повышенной температуры.

Выполним оценку влияния релаксации остаточных напряжений на изменение геометрии трубных металлоизделий в процессе длительного хранения или последующей эксплуатации.

Релаксация напряжений описывается уравнением для среды Максвелла, которое имеет следующий вид [8]:

$$\frac{d\varepsilon}{dt} = \frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\mu_0}, \quad (19)$$

где σ – действующее напряжение; μ_0 – параметр, характеризующий упруго-вязкие свойства материала; t – время.

Если $\varepsilon = \operatorname{const}$, то $\frac{d\varepsilon}{dt} = 0$, и уравнение (19) принимает следующий вид:

$$\frac{1}{E} \frac{d\sigma}{dt} + \frac{\sigma}{\mu_0} = 0, \quad (20)$$

решением которого является уравнение, описывающее изменение напряжения во времени

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(-\frac{t}{t_p}\right), \quad (21)$$

где $t_p = \frac{E}{\mu_0}$ – время релаксации; σ_0 – напряжение в начальный момент времени.

В соответствии с соотношением (21) можно определить изменение остаточных напряжений во времени, при этом:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= -a_0(R_1 - r)(r - R_2) \exp\left(-\frac{t}{t_p}\right); \\ \sigma_\theta &= a_0[(r - R_1)(r - R_2) + r(2r - R_1 - R_2)] \exp\left(-\frac{t}{t_p}\right); \\ \sigma_z &= a_0\mu[2(r - R_1)(r - R_2) + r(2r - R_1 - R_2)] \exp\left(-\frac{t}{t_p}\right). \end{aligned} \right\} \quad (22)$$

Как следует из соотношений (22), за счет релаксации напряжений величина остаточных напряжений с течением времени изменяется пропорционально $\exp\left(-\frac{t}{t_p}\right)$. Если металлоизделие не разрушилось от остаточных напряжений в процессе изготовления, то опасность разрушения в процессе хранения либо эксплуатации в составе конструкции уменьшается. При полной релаксации напряжений $t = t_p, \exp\left(-\frac{t}{t_p}\right) = \exp(-1)$,

что составляет 0,367 от исходного напряженного состояния, т.е. остаточные напряжения при полной релаксации составляют 0,367 от напряжений, соответствующих моменту производства металлоизделия.

В процессе релаксации напряжений происходит некоторое изменение геометрии трубы за счет изменения относительной окружной деформации трубного изделия, определяемой законом Гука:

$$\varepsilon_\theta = \frac{1}{E}[\sigma_\theta - \mu(\sigma_r + \sigma_z)], \quad (23)$$

что после подстановки выражений для напряжений даст

$$\varepsilon_\theta = \frac{a_0}{E} \left[(r - R_1)(r - R_2)(1 - \mu - 2\mu^2) + r(2r - R_1 - R_2)(1 - \mu^2) \right] \exp\left(-\frac{t}{t_p}\right). \quad (24)$$

Для внешней поверхности трубы ($r = R_1$) из выражения (24) имеем

$$\varepsilon_\theta = \frac{a_0}{E} R_1^2 \delta(1 - \mu - \mu^2) \exp\left(-\frac{t}{t_p}\right), \quad (25)$$

где $\delta = R_1 - R_2$ – толщина стенки трубы.

Соответственно для внутренней поверхности ($r = R_2$) получим

$$\varepsilon_\theta = -\frac{a_0}{E} R_2 \delta(1 - \mu^2) \exp\left(-\frac{t}{t_p}\right). \quad (26)$$

Относительная окружная деформация определяется соотношением

$$\varepsilon_\theta = \frac{U}{r}, \quad (27)$$

где U – радиальная упругая деформация трубного металлоизделия.

Из выражения (27) следует

$$U = \varepsilon_\theta \cdot r. \quad (28)$$

Результаты исследования и их обсуждение

Геометрия трубного металлоизделия определяется геометрическими параметрами R_1 и R_2 .

Для внешнего радиуса ($r = R_1$) упругую деформацию вследствие релаксации остаточных напряжений соотношение (28) даст

$$U_1 = \frac{a_0}{E} R_1^2 (1 - \mu^2) \delta \exp\left(-\frac{t}{t_p}\right). \quad (29)$$

Соответственно изменение внутреннего радиуса ($r = R_2$) за счет релаксации остаточных напряжений будет равно

$$U_2 = -\frac{a_0}{E} R_2^2 (1 - \mu^2) \delta \exp\left(-\frac{t}{t_p}\right). \quad (30)$$

Из соотношений (29) и (30) следует, что при релаксации напряжений произойдет увеличение радиуса R_1 на величину U_1 и уменьшение радиуса R_2 на величину U_2 .

Расчеты по вышеприведенным формулам говорят о возможности существенного изменения геометрии трубных металлоизделий за счет релаксации остаточных напряжений, что может быть актуальным при производстве металлоизделий высокой точности.

Выводы

1. Предложена методика расчета остаточных напряжений при производстве трубных металлоизделий волочением с использованием энергетического подхода.

2. Методика дополнена учетом релаксации остаточных напряжений и анализом влияния релаксации на напряженно-деформированное со-

стояние металлоизделий в процессе либо хранения, либо последующей эксплуатации.

3. Показано, что в результате релаксации остаточных напряжений происходит изменение геометрии трубных металлоизделий. При производстве трубных металлоизделий высокой точности изменение геометрии может быть существенным.

Список литературы

1. Соколов И.А., Уральский В.И. Остаточные напряжения и качество металлопродукции. М.: Металлургия, 1981. 96 с.
2. Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В., Тиунов В.В. Технологические остаточные напряжения и их влияние на долговечность и надежность металлоизделий. Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2012. 226 с.
3. Амензаде Ю.А. Теория упругости: учебник для университетов. 3 изд., доп. М.: Высш. шк., 1976. 222 с.
4. Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В. Технологические остаточные напряжения после обработки металлов давлением // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. 2016. Т. 16. С. 41–45.
5. Пат. 2276779 Российской Федерации. Способ определения показателя деформативности материала / Г.Л. Колмогоров, Т.Е. Мельникова, Е.В. Кузнецова; заявитель и патентооблатель Пермский государственный технический университет. Опубл. 20.08.2009. Бюл. №14.
6. Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В. О степени деформации при осесимметричном деформировании // Изв. вузов. Черная металлургия. 2000. №11.
7. Малинин Н.Н. Прикладная теория пластичности и ползучести. М.: Машиностроение, 1975.
8. Kachanov L.M. Fundamentals of the theory of plasticity. N.Y. Conrier Daver Publ, 2004.
9. Тепловые процессы при обработке металлов и сплавов давлением: учеб. пособие для вузов / Яловой Н.И., Тылкин М.А., Полухин П.И., Васильев Д.И. М.: Высш. шк., 1973.
10. Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В., Хабарова Д.В. Остаточные напряжения и предельная деформируемость при волочении осесимметричных металлоизделий // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. №10. С. 156–161.
11. Пат. 2344912 Российская Федерация. Способ определения остаточных напряжений / Г.Л. Колмогоров, Е.В. Кузнецова // БИ. 2009. № 25; опубл. 10.09.2009.
12. Гольденблат И.И., Копнов В.А. Критерии прочности и пластичности конструкционных материалов. М.: Машиностроение, 1968.
13. Экспериментальная механика / Букеткин Б.В., Горбатовский А.А., Кисенко И.Д. и др.; под ред. Вафина Р.К., Нарайкина О.С. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2004. 136 с.
14. Радченко В. П., Саушкин М. Н. Ползучесть и релаксация остаточных напряжений в упрочненных конструкциях. М.: Машиностроение, 2005. 226 с. ISBN 5-94275-244-3.
15. Борзыка А.М., Гецов Л.Б. Релаксация напряжений в металлах и сплавах. Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Металлургия, 1978. 256 с.

Поступила 11.08.18
Принята в печать 11.09.18

INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-103-108>

RELAXATION OF RESIDUAL STRESSES AND PRECISION OF STEEL PIPES

German L. Kolmogorov – DSc (Eng.), Professor

Perm National Research Polytechnic University, full member of the Russian Academy of Natural Sciences, Perm, Russia.

Elena V. Kuznetsova – PhD (Eng.), Associate Professor

Perm National Research Polytechnic University. Perm, Russia. E-mail: mellen75@mail.ru

Diana Khabarova – Postgraduate Student

Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia. E-mail: habarik28@mail.ru

Abstract

This paper describes a study of residual stress patterns characterizing cold plastic deformation of axisymmetric steel products. The authors propose a technique for calculating residual stresses created in axisymmetric steel pipes during plastic deformation, which accounts for the degree of plastic deformation, the key process parameters, as well as the mechanical properties of the processed material. The energy approach helped the authors determine the residual stresses in axisymmetric workpieces as a function of the key plastic deformation process parameters. Analytical

solutions were obtained. The formulas for determining residual stresses include the key process parameters, the mechanical properties of the material and the product dimensions. With the help of the analytical relationships for determining residual stresses, one can predict the operational behaviour of steel products and prevent fractures. Operational stresses and deformations tend to change over time, even under constant loads. The authors analysed the effect of post-deformation relaxation of post-deformation residual stresses on the geometry of finished steel pipes. Knowing the actual residual stresses, one can predict the

operational behaviour of steel products and prevent fractures. The importance of the problem of determining residual stresses lies in the fact that they can enhance the performance of steel products but they can also affect it. For theoretical definition of residual stresses, one would need to solve a rather complex thermoelastoplasticity problem, as well as a problem related to the mechanics of solid deformable bodies. One only finds scarce published sources – either domestic or foreign – that would describe such solutions with regard to production processes.

Keywords: Residual stresses, axisymmetric steel products, degree of plastic deformation, stress relaxation, precision of steel pipes.

References

1. Sokolov I.A., Uralsky V.I. *Ostatochnye napryazheniya i kachestvo metalloproduktsii* [Residual stresses and quality of steel products]. Moscow: Metallurgiya, 1981, 96 p. (In Russ.)
2. Kolmogorov G.L., Kuznetsova E.V., Tiunov V.V. *Tekhnologicheskie ostatochnye napryazheniya i ikh vliyanie na dolgovechnost i nadezhnost metalloizdeliy* [Production-related residual stresses and their effect on the durability and reliability of steel products]. Perm: Publishing house of PNRPU, 2012, 226 p. (In Russ.)
3. Amenzade Yu.A. *Teoriya uprugosti: uchebnik dlya universitetov* [Theory of elasticity: Textbook for universities]. 3rd revised edition. Moscow: Vysshaya shkola, 1976. 222 p. (In Russ.)
4. Kolmogorov G.L., Kuznetsova E.V. Residual stresses in metals after forming. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Metallurgiya* [Bulletin of the South Ural State University. Series: Metallurgy], 2016, vol. 16, p. 41–45. (In Russ.)
5. Kolmogorov G.L., Melnikova T.E., Kuznetsova E.V. *Sposob opredeleniya pokazatelya deformativnosti materiala* [Method for determining the stress-strain performance of a material]. Patent RF, no. 2276779, 2009.
6. Kolmogorov G.L., Kuznetsova E.V. On the degree of deformation in axially symmetric deformation. *Izvestiya Vuzov. Chernaya metallurgiya* [University proceedings. Ferrous metallurgy], 2000, no. 11. (In Russ.)
7. Malinin N.N. *Prikladnaya teoriya plastichnosti i polzuchesti* [Applied theory of plasticity and creep]. Moscow: Mashinostroenie, 1975. (In Russ.)
8. Kachanov L.M. Fundamentals of the theory of plasticity. N.Y. Conrier Daver Publ, 2004.
9. Yalovoy N.I., Tylikin M.A., Polukhin P.I., Vasilev D.I. *Teplovye protsessy pri obrabotke metallov i splavov davleniem: ucheb. posobie dlya vuzov* [Thermal processes in the forming of metals and alloys: Textbook for universities]. Moscow: Vysshaya shkola, 1973. (In Russ.)
10. Kolmogorov G.L., Kuznetsova E.V., Khabarova D.V. Residual stresses and ultimate deformability in the drawing of axially symmetric steel parts. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of the Tula State University. Engineering sciences], 2015, No. 10, p. 156–161. (In Russ.)
11. Kolmogorov G.L., Kuznetsova E.V. *Sposob opredeleniya ostatochnykh napryazheniy* [Method for determining residual stresses]. Patent RF, no. 2344912, 2009.
12. Goldenblat I.I., Kopnov V.A. *Kriterii prochnosti i plastichnosti konstruktionsnykh materialov* [Structural durability and plasticity criteria]. Moscow: Mashinostroenie, 1968. (In Russ.)
13. Buketkin B.V., Gorbatovsky A.A., Kisenko I.D. et al. *Ekspерimental'naya mekhanika* [Experimental mechanics]. Ed. by R.K. Vafin, O.S. Naraykin. Moscow: Publishing House of BMSTU, 2004, 136 p. (In Russ.)
14. Radchenko V.P., Saushkin M.N. *Polzuchest i relaksatsiya ostatochnykh napryazheniy v uprochnennykh konstruktsiyakh* [Creep and relaxation of residual stresses in reinforced structures]. Moscow: Mashinostroenie, 2005, 226 p. ISBN 5-94275-244-3. (In Russ.)
15. Borzdyka A.M., Getsov L.B. *Relaksatsiya napryazheniy v metallakh i splavakh* [Stress relaxation in metals and alloys]. 2nd revised edition. Moscow: Metallurgiya, 1978. 256 p. (In Russ.)

Received 11/08/18

Accepted 11/09/18

Образец для цитирования

Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В., Хабарова Д.В. Релаксация остаточных напряжений и точность трубных металлоизделий // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №3. С. 103–108. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-103-108>

For citation

Kolmogorov G.L., E.V. Kuznetsova E.V., Khabarova D. Relaxation of residual stresses and precision of steel pipes. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 3, pp. 103–108. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-103-108>
