

М. В. Полоник<sup>1,2</sup>, Е. Е. Рогачев<sup>1</sup>

## УМЕНЬШЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В МЕТАЛЛАХ ПРИ НАГРЕВАНИИ НИЖЕ ПРЕДЕЛА ТЕКУЧЕСТИ

<sup>1</sup>Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН,  
г. Владивосток, Россия

<sup>2</sup>Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия

**Аннотация.** Моделируется процесс снятия остаточных напряжений в металлах при температурном воздействии. Рассмотрены режимы в стадии медленного нагрева до температуры, не создающей дополнительных необратимых деформаций, выдержки при этой температуре и режим медленного охлаждения. Стадия выдержки моделируется с учетом ползучих свойств материалов. Рассматриваются краевые задачи и описываются закономерности, отвечающие за снятие остаточных напряжений. В условиях ползучести Норттона получены аналитические решения.

**Ключевые слова:** остаточные напряжения, упругопластические деформации, пластическое течение, реология, отжиг, температурное воздействие.

УДК: 539.374

**Введение.** При отсутствии каких-либо внешних воздействий в телах или конструкциях всегда присутствуют напряжения, которые принято называть остаточными [1], [2]. Такие напряжения чаще всего отрицательно влияют на дальнейшую эксплуатацию изделий, вызывая коробление, возникновение трещин и в конечном итоге разрушение. В настоящее время для избежания таких долгостоящих разрушений разработаны и применяются различные способы, приводящие к снятию таких нежелательных напряжений. В технологической практике одним из способов является процесс термической обработки, предполагающий медленный нагрев материала до определённой температуры, выдержку и последующее медленное охлаждение.

---

© Полоник М. В., Рогачев Е. Е., 2016  
Полоник Марина Васильевна  
e-mail: polonic@iacp.dvo.ru, кандидат физико-математических наук, Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН, Дальневосточный федеральный университет, г. Владивосток, Россия.  
Рогачев Егор Егорович  
e-mail: egor1805@mail.ru, магистр, инженер-программист, Институт автоматики и процессов управления Дальневосточного отделения РАН, г. Владивосток, Россия.

Работа выполнена при частичной финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 14-01-31069-мол\_а).

Поступила 17.12.2015

Отметим, что термообработка (или нагрев для уменьшения остаточных напряжений, или отжиг для уменьшения напряжений) в зависимости от температуры нагрева и скорости охлаждения металла бывает разных видов. Как правило, для максимального уменьшения остаточных напряжений применяют высокотемпературный отжиг. Такой отжиг проводится в районе температур, не превышающих некоторую максимальную температуру, выше которой могут происходить структурные превращения (например, сталь от 450 до 650 °C). Низкотемпературный отжиг применяется к деталям, для которых более важным является сохранение поверхностной твердости, нежели максимальное уменьшение остаточных напряжений. Проводят такой отжиг при температурах до 250 °C (сталь). Нагрев до температуры отжига необходимо производить медленно, так, чтобы пониженные значения предела текучести при заданной температуре отжига были по возможности достигнуты одновременно и равномерно по всему сечению изделия. Режим охлаждения также является важнейшей стадией процесса, поскольку нарушение предписанного технологией режима охлаждения не только уменьшает эффект снятия напряжений, но может даже увеличить напряжения по сравнению с исходным состоянием.

Результаты моделирования высокотемпературного отжига представлены в [3]. На примере полого шара с накопленными необратимыми деформациями [4] в рамках линейного упругопластического тела показана возможность уменьшения остаточных напряжений. Моделирование осуществлялось квазистатическим процессом дополнительного деформирования при медленном нагревании, выдержке при определенной температуре и медленном охлаждении. Также в [3] показано, что без учета стадии выдержки, которую было предложено рассматривать с учетом ползучих свойств материалов [5], [6], снятие остаточных напряжений не происходит, более того, как и в [7], наблюдается их рост и повторное пластическое течение при охлаждении. В данной работе на основе полученных в [3] исследований представлены краевые задачи и описаны закономерности, отвечающие за снятие остаточных напряжений при низкотемпературном воздействии, – низкотемпературный отжиг. Как и в [3], за основу накопленных напряжений были приняты расчеты [4]. Необходимым условием этого выступала статическая определимость процесса пластического течения [9], [10]. В качестве закона ползучести для получения аналитического решения принят степенной закон ползучести Нортона [8].

**Предварительно накопленные остаточные напряжения.** Как и в [3], рассматривался полый шар ( $R_0$ ,  $r_0$ ,  $r_0 < R_0$ ) с предварительно накопленными необратимыми деформациями:

$$\begin{aligned} e_{rr}^p &= -2k\gamma - Ar^{-3}, \\ e_{\theta\theta}^p = e_{\varphi\varphi}^p &= -e_{rr}^p/2, \quad \gamma = (\lambda + 2\mu)(3\lambda + 2\mu)^{-1}\mu^{-1}, \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} e_{rr} &= d_{rr} = \partial u / \partial r, \\ e_{\theta\theta} = e_{\varphi\varphi} &= d_{\theta\theta} = d_{\varphi\varphi} = u / r, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $d_{rr}$  и  $d_{\theta\theta}$  – компоненты полных деформаций;  $\lambda$ ,  $\mu$  – параметры Ламе;  $k$  – предел текучести;  $A$  – константа, определяется по измеренным на внутренней границе полным деформациям  $d_{rr}(r_0)$  и заданным напряжениям  $\sigma_{\theta\theta}(r_0) = -2k$ . Уровень остаточных напряжений (рис. 1) рассчитан для образца из стали 30ХГСН2А с параметрами:  $\lambda = 1.8 \cdot 10^{11}$  Па,  $\mu = 8.1 \cdot 10^{10}$  Па,  $k = 1350 \cdot 10^6$  Па; геометрическими размерами:

$r_0/R_0 = 0.2$ ,  $R_0/R_0 = 1$ ; заданными  $\sigma_{\theta\theta}(r_0) = -2k\text{Па}$  и измеренными  $d_{rr}(r_0) = 0.03812$ ;  $\sigma_{rr}(R_0) = 0$ ,  $\sigma_{rr}(r_0) = 0$ .

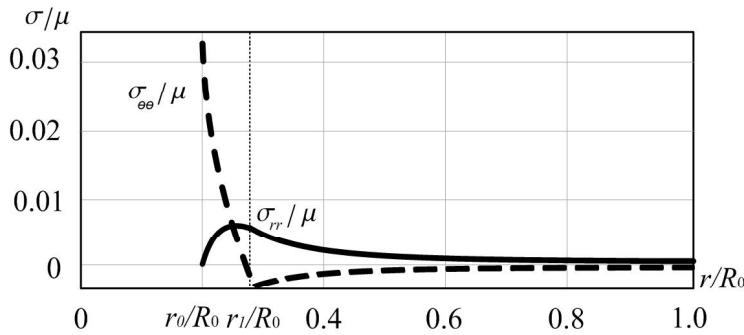


Рис. 1. Распределение предварительных остаточных напряжений для стали марки 30ХГСН2А при  $T = 20^\circ\text{C}$

На всех рисунках приведены безразмерные величины  $\sigma/\mu$ ,  $r/R_0$  ( $\sigma_{rr}/\mu$  – сплошная,  $\sigma_{\theta\theta}/\mu$  – пунктирная линии). Представленное состояние среды будем считать исходным, тогда учитем, что в предположении необратимой несжимаемости, в сферической системе координат  $(r, \theta, \varphi)$ , существует две области:  $r_1 < r \ll R_0$  – упругая и  $r_0 \ll r \ll r_1$  – упругопластическая,  $r_1$  – граница областей. Упругопластическая область  $r_0 \ll r \ll r_1$  содержит накопленные телом при предварительном деформировании необратимые пластические деформации (1). В упругой области  $r_1 < r \ll R_0$  пластические деформации (1)  $e_{rr}^p$  и  $e_{\theta\theta}^p$  равны нулю, а упругие деформации (2)  $e_{rr}$  и  $e_{\theta\theta}$  зависят от компоненты перемещений  $u = u_r(r)$ .

**Моделирование стадии медленного низкотемпературного нагрева.** Проледим за изменениями напряжений (рис. 1) в материале на стадии медленного нагрева. В рамках закона Дюамеля – Неймана [11] с ростом температуры напряжения в среде будут изменяться согласно:

$$\begin{aligned}\sigma_{rr} &= \lambda(e_{rr} + 2e_{\theta\theta}) + 2\mu e_{rr} - 3\alpha_T K(T - T_0), \\ \sigma_{\theta\theta} &= \sigma_{\varphi\varphi} = \sigma_{rr} + 2\mu(e_{\theta\theta} - e_{rr}),\end{aligned}\quad (3)$$

где  $\alpha_T$  – коэффициент линейного теплового расширения;  $K = \lambda + 2/3\mu$  – упругий модуль всестороннего сжатия;  $T$ ,  $T_0$  – текущая, начальная температура. Тогда для упругой области  $r_1 < r \ll R_0$  компоненты упругих деформаций  $e_{rr}$  и  $e_{\theta\theta}$  в (3) выражаются согласно (2). Для области  $r_0 \ll r \ll r_1$  в (3) следует учесть уровень накопленных необратимых деформаций  $e_{rr}^p$  и  $e_{\theta\theta}^p$ , определенный в (1):

$$\begin{aligned}e_{rr} &= d_{rr} - e_{rr}^p = \partial u / \partial r - e_{rr}^p, \\ e_{\theta\theta} &= e_{\varphi\varphi} = d_{\theta\theta} - e_{\theta\theta}^p = u/r - e_{\theta\theta}^p.\end{aligned}\quad (4)$$

Решение (4) справедливо при выполнении в области  $r_0 \ll r \ll r_1$  условия  $\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta} < 2k_2$ , где  $k_2$  – предел текучести.

С повышением температуры происходит изменение предела текучести материала  $k_2 = k_2(T)$ :  $k_2 = 1350 \cdot 10^6 - 5(T - 200)(T - 100)(T - 20)(400 + 3T)/1824$ . Данная функция построена по известным экспериментальным данным [12]. Заметим, что для стали марки 30ХГСН2А в диапазоне температур 20–250°C предел текучести

$k_2 = 1350 \cdot 10^6 = const$  не меняется. Таким образом, условие  $\sigma_{rr} - \sigma_{\theta\theta} < 2k_2$  выполняется на протяжении всего процесса равномерного нагревания до  $T_1 = 250^\circ\text{C}$ . При этой же температуре и ниже в технологической практике производится отжиг стали марки 30ХГСН2А, называемый низкотемпературным. Расчеты показывают, что при таком низкотемпературном воздействии в среде не возникает необратимых процессов. Как отмечалось в [3], для появления необратимых процессов необходимо выполнять равномерный нагрев до  $T_2 = 480^\circ\text{C}$ .

**Моделирование стадии выдержки.** Для материалов, находящихся под длительным влиянием неизменной температуры, характерно проявление свойств ползучести, стадию выдержки будем моделировать с учетом этих свойств. Ползучесть описываем с помощью степенного закона Нортон [8]. Для степени  $n = 3$  получено аналитическое решение. Для необратимых деформаций получено соотношение:

$$\begin{aligned} e_{rr}^\nu &= -(Bt\gamma^{-2} + c)^{-1} - A_1 r^{-3}, \\ e_{\theta\theta}^\nu &= -e_{rr}^\nu/2. \end{aligned} \quad (5)$$

В (5)  $B$  – параметр материала;  $c$  – определяется при  $e_{rr}^\nu(t = 0) = e_{rr}^p$ ;  $A_1$  – константа, определяется напряженно деформированным состоянием среды. Изменение необратимых (ползучих) деформаций (5) теперь следует учесть как в области  $r_2 < r \ll R_0$ , так и в области  $r_0 \ll r \ll r_2$  с накопленными пластическими деформациями (1). Параметр  $c$  в области  $r_2 < r \ll R_0$  определяется при условии, что в момент времени  $t = 0$  (связано с началом процесса выдержки)  $e_{rr}^p = 0$ :  $c = r^3 A^{-1}$ . В области  $r_0 \ll r \ll r_2$  с накопленными пластическими деформациями (1)  $e_{rr}^p = -2k\gamma - Ar^{-3}$ :  $c = r^3(A - A_1 + 2kr^3\gamma)^{-1}$ .

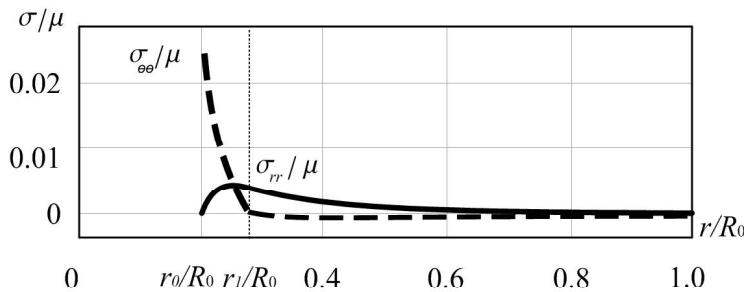


Рис. 2. Распределение остаточных напряжений во всем слое для стали марки 30ХГСН2А после охлаждения до  $T = 20^\circ\text{C}$

Произведен расчет напряжений при выдержке  $t = 2.6$  часа при  $T = 250^\circ\text{C}$ . При неизменной общей деформации напряжения в теле с течением времени перераспределяются – происходит их релаксация. Если теперь тело охладить до комнатной температуры, в окрестности уровень остаточных напряжений изменится (рис. 1 и рис. 2). Процесс низкотемпературного воздействия и его снятия, в отличие от высокотемпературного [3], приводит к значительному снижению уровня предварительно накопленных необратимых деформаций и остаточных напряжений (рис. 2).

**Заключение.** Расчеты остаточных напряжений по зависимостям полученных точных решений привели к частичной релаксации остаточных напряжений. Данный опытный факт промоделирован на основе линейной упругопластической модели в

условиях неизменного предела текучести материала с ростом температуры и при учете ползучих свойств материалов на стадии выдержки. Для моделирования технологического приема отжига именно учет ползучести на стадии выдержки позволяет получить результат, имеющий место в технологической практике.

## ЛИТЕРАТУРА

- [1] Чернышев Г. Н., Попов А. Л., Козинцев В. М., Пономарев И. И. Остаточные напряжения в деформируемых твердых телах. М.: Наука, 1996. 240 с.
- [2] Белл Дж. Ф. Экспериментальные основы механики деформируемых твердых тел. В 2-х частях. Часть II. М.: Наука, 1984. 432 с.
- [3] Polonik M. V., Rogachev E. E. A Decrease of Residual Stresses in the Elastic-Plastic-Creep Medium at Temperature Influence // Advanced Materials Research, 1040 (2014) 870–875. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.870.
- [4] Полоник М. В., Рогачев Е. Е. О снятии остаточных напряжений в упругопластической среде на примере полого шара // XXXVI Дальневосточная математическая школа-семинар имени академика Е.В. Золотова, 4-10 сентября 2012 г., Владивосток: сборник материалов. (Электронный ресурс). Владивосток: ИАПУ ДВО РАН, 2012. С. 175–177. Объем 600 Мб; 1 опт. компакт-диск (CD-ROM).
- [5] Murashkin E. V., Polonik M. V. Development of approaches to the creep process modeling under large deformations // Applied Mechanics and Materials, 249–250 (2013) 833–837.
- [6] Murashkin E. V., Polonik M. V. Determination of a Loading Pressure in the Metal Forming by the Given Movements // Advanced Materials Research, 842 (2014) 494–499.
- [7] Burenin A. A., Kovtanjuk L. V., Terletskiy I. A. To the Formation of Residual Stress Field in the Vicinity of a Spherical Cavity Viscoelastoplastic Material // Far Eastern Mathematical Journal, 12(2) (2012) 146–159.
- [8] Локощенко А. М. Моделирование процесса ползучести и длительной прочности металлов. М.: МГИУ. 2007. 264 с.
- [9] Burenin A. A., Kovtanyuk L. V., Polonik M. V. The possibility of reiterated plastic flow at the overall unloading of an elastoplastic medium // Doklady Physics, 45(12) (2000) 694–696. DOI: 10.1134/1.1342452.
- [10] Burenin A. A., Kovtanyuk L. V., Polonik M. V. The formation of a one-dimensional residual stress field in the neighbourhood of a cylindrical defect in the continuity of an elastoplastic medium // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. 67 (2003) 283–292. DOI: 10.1016/S0021-8928(03)90014-1.
- [11] Карслю Г., Егер Г. Теплопроводность твердых тел. М.: Наука, 1964. 487 с.
- [12] Физические величины. Справочник / под ред. И. С. Григорьева, Е. З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1231 с.

M. V. Polonik<sup>1,2</sup>, E. E. Rogachev<sup>1</sup>

## REDUCING THE RESIDUAL STRESSES IN METALS AT TEMPERATURES THAT DO NOT LEAD TO PLASTIC FLOW

<sup>1</sup>*Institute of Automation and Control Processes of Far-Eastern Branch of RAS, Vladivostok, Russia*

<sup>2</sup>*Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia*

**Abstract.** The process of removing the residual stresses in metal under heating is simulated. There have been examined modes at the stages of slow heating to the temperature that do not lead to plastic flow, holding at this temperature, and slow cooling stage. The holding stage is modeled with consideration of creeping properties of materials. The boundary value problems are examined and the patterns responsible for the removal of residual stresses are described. The analytical solutions are obtained under the conditions of Norton's creep.

**Keywords:** residual stresses, elastic-plastic deformations, plastic flow, rheology, annealing temperature exposure.

## REFERENCES

- [1] Chernyshev G. N., Popov A. L., Kozintsev V. M., Ponomarev I. I. Residual stresses in deformable solids. M.: Nauka, 1996. 240 p. (In Russian)
- [2] Bell J. F. Experimental foundations of mechanics of deformable solids. In 2 parts. Part II. M.: Nauka, 1984. 432 p. (In Russian)
- [3] Polonik M. V., Rogachev E. E. A Decrease of Residual Stresses in the Elastic-Plastic-Creep Medium at Temperature Influence // Advanced Materials Research, 1040 (2014) 870–875. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.1040.870.
- [4] Polonik M. V., Rogachev E. E. On the removal of residual stresses in the elastic-plastic medium for example a hollow sphere // XXXVI Far Eastern Mathematical Workshop Academician E.V. Zolotov, 4-10 September. 2012, Vladivostok: compendium. (Electronic resource). Vladivostok: IACP. 2012. S. 175-177. Volume of 600 MB, 1 opt. CD-ROM (CD-ROM). (In Russian)
- [5] Murashkin E. V., Polonik M. V. Development of approaches to the creep process modeling under large deformations // Applied Mechanics and Materials, 249–250 (2013) 833–837.
- [6] Murashkin E. V., Polonik M. V. Determination of a Loading Pressure in the Metal Forming by the Given Movements // Advanced Materials Research, 842 (2014) 494–499.
- [7] Burenin A. A., Kovtanjuk L. V., Terletskiy I. A. To the Formation of Residual Stress Field in the Vicinity of a Spherical Cavity Viscoelastoplastic Material // Far Eastern Mathematical Journal, 12(2) (2012) 146–159.

*Polonik, Marina Vasilyevna*

e-mail: polonic@iacp.dvo.ru, Ph.D., Senior Researcher, Institute of Automation and Control Processes of Far-Eastern Branch of RAS; Associate professor, Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia

*Rogachev, Egor Egorovich*

e-mail: egor1805@mail.ru, Master, Software Engineer, Institute of Automation and Control Processes of Far-Eastern Branch of RAS, Vladivostok, Russia

- [8] Lokoshchenko A. M. Process modeling creep and stress rupture of metals. M.: MSIU, 2007.
- [9] Burenin A. A., Kovtanyuk L. V., Polonik M. V. The possibility of reiterated plastic flow at the overall unloading of an elastoplastic medium // Doklady Physics, 45(12) (2000) 694-696. DOI: 10.1134/1.1342452.
- [10] Burenin A. A., Kovtanyuk L. V., Polonik M. V. The formation of a one-dimensional residual stress field in the neighbourhood of a cylindrical defect in the continuity of an elastoplastic medium // Journal of Applied Mathematics and Mechanics. 67 (2003) 283-292. DOI: 10.1016/S0021-8928(03)90014-1.
- [11] Carslaw G. Thermal conductivity of solids / G. Carslaw, G. Jaeger. M.: Nauka, 1964. 487 p.
- [12] Physical quantities. Handbook / edited by I. S. Grigoriev, E. Z. Meylthova. M.: Energoatomizdat, 1991. (In Russian)