Силина О.В., Ледон Д.Р., Бабкин Е.О., Босяков М.Н. Оценка остаточных напряжений в биметаллических цилиндрах плунжерного насоса после термодеформационной обработки // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. – 2023. – № 6. С. 115–123. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.6.11

Silina O.V., Ledon D.R., Babkin E.O., Bosyakov M.N. Estimation of residual stresses in bimetallic plunger pump cylinders after thermal deformation. *PNRPU Mechanics Bulletin*, 2023, no. 6, pp. 115-123. DOI: 10.15593/perm.mech/2023.6.11

пермский политех

ВЕСТНИК ПНИПУ. МЕХАНИКА
№ 6, 2023
PNRPU MECHANICS BULLETIN
https://ered.pstu.ru/index.php/mechanics/index



Научная статья

DOI: 10.15593/perm.mech/2023.6.11
УДК 621.78.01:621.774.5:621.651

ОЦЕНКА ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ЦИЛИНДРАХ ПЛУНЖЕРНОГО НАСОСА ПОСЛЕ ТЕРМОДЕФОРМАЦИОННОЙ ОБРАБОТКИ

О.В. Силина[1], Д.Р. Ледон[2], Е.О. Бабкин[1], М.Н. Босяков[3]

[1]Пермский национальный исследовательский политехнический университет, Пермь, Российская Федерация
[2]Институт механики сплошных сред УрО РАН, Пермь, Российская Федерация
[3]Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, Минск, Республика Беларусь

О СТАТЬЕ

Получена: 31 июля 2023 г.
Одобрена: 12 ноября 2023 г.
Принята к публикации: 31 ноября 2023 г.

Ключевые слова:

лейнер, обечайка, биметаллические трубы, холодная радиальная ковка, адгезионная прочность, постдеформационный нагрев, внутренние напряжения, сталь, образец, цилиндр.

АННОТАЦИЯ

Плунжерные насосы, используемые для нефтедобычи, изготавливаются из длинных полых биметаллических цилиндров. С целью повышения прочностных и иных физико-механических характеристик данные элементы конструкции подвергаются термомеханической обработке. В процессе таких воздействий в изделиях возникают остаточные напряжения, которые могут приводить к положительным, нежелательным и недопустимым изменениям геометрии. В настоящей работе рассмотрена задача выбора оптимальных режимов обработки. В связи с трудоёмкостью оценки остаточных напряжений во всём изделии было решено использовать небольшие кольца, являющиеся представительными для каждой конкретной трубы. Ввиду сложности или невозможности применения существующих методов предложена методика, которая позволяет оценить уровень остаточных напряжений. Для этого сформулирована и решена задача в рамках теории упругости. Получено аналитическое решение, которое позволяет находить уровень напряжений в зависимости от экспериментальных измерений при разрезании колец. Рассмотрено три различных материала – стали 38Х2МЮА, 15Х5М, 12Х18Н10Т. Исходя из условий эксплуатации, сформулировано четыре критерия оптимизации при термообработке: минимальный уровень остаточных напряжений в трубе; минимальная разница между напряжениями в обечайке и лейнере; минимальное изменение радиуса трубы после обработки; наибольшее значение адгезии между лейнером и обечайкой. Согласно введённым критериям, проведён анализ полученных результатов. Выявлены оптимальные режимы термомеханической обработки и отброшены недопустимые, которые приводят к нежелательным изменениям в изделиях. Для каждого исследуемого материала установлены необходимая степень деформации и температура постдеформационного нагрева. В результате даны рекомендации промышленному предприятию по производственному процессу.

© ПНИПУ

© **Силина Ольга Валентиновна** – к.т.н., доц. кафедры металловедения, термической и лазерной обработки металлов, e-mail: silina-olga@mail.ru.
Ледон Дмитрий Рудольфович – к.ф.-м.н., вед. инж. лаборатории физических основ прочности, институт механики сплошных сред УрО РАН, e-mail: ledon@icmm.ru.
Бабкин Евгений Олегович – магистр кафедры металловедения, термической и лазерной обработки металлов, e-mail: Babkin.Evgenii.Olegovich@yandex.ru.
Босяков Михаил Никифорович – к.ф.-м.н., доцент, e-mail: plasma.by.metal@gmail.com.

Olga V. Silina – PhD in Technical Sciences, Ass. Professor of the Department of Metal Science, Thermal and Laser Processing of Metals, PNRPU, e-mail: silina-olga@mail.ru.
Dmitry R. Ledon – PhD in Physical and Mathematical Sciences, Leading Engineer of the Laboratory of Physical Bases of Strength, e-mail: ledon@icmm.ru.
Evgeny O. Babkin – Master of Technical Sciences, Department of Metal Science, Thermal and Laser Processing of Metals, e-mail: Babkin.Evgenii.Olegovich@yandex.ru.
Mikhail N. Bosyakov – PhD in Physical and Mathematical Sciences, Ass. Professor, e-mail: plasma.by.metal@gmail.com.

Эта статья доступна в соответствии с условиями лицензии Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)
This work is licensed under a Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0)

ESTIMATION OF RESIDUAL STRESSES IN BIMETALLIC PLUNGER PUMP CYLINDERS AFTER THERMAL DEFORMATION

O.V. Silina[1], D.R. Ledon[2], E.O. Babkin[1], M.N. Bosyakov[3]

[1]Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russian Federation
[2]Institute of Continuum Mechanics, RAS Ural Branch, Perm, Russian Federation
[3]Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Minsk, The Republic of Belarus

ARTICLE INFO

Received: 31 July 2023
Approved: 12 November 2023
Accepted for publication:
31 November 2023

Keywords:

liner, shell, bimetallic pipe, cold radial forging, adhesive strength, post-deformation heating, internal stresses, steel, sample, cylinder.

ABSTRACT

Plunger pumps used in oil production are made of long hollow bimetallic cylinders. These components are thermo-mechanically treated to improve strength and other physical and mechanical properties. These operations result in residual stresses within the parts, which can lead to positive, undesirable and unacceptable changes in the geometry. In the present work, we consider the problem of choosing the optimal machining modes. Estimations of residual stresses in the whole product take too much time, so it was decided to use small rings, which are representative for each particular pipe. In view of complexity or impossibility of applying the existing methods, the authors have designed a novel technique to estimate the level of residual stresses. For this purpose, we formulated and solved this problem within the theory of elasticity. An analytical solution, which makes it possible to find the level of stresses depending on the experimental measurements when cutting the rings, has been obtained. Three different steels were chosen. i.e. 38Cr2MoAl, 15Cr5Mo, 12Cr18Ni10Ti. Based on operating conditions, four optimization criteria for the heat treatment have been produced: the minimum level of residual stresses in the pipe; the minimum difference between stresses in the shell and liner; the minimum change in the pipe radius after the treatment; the highest value of adhesion between the liner and the shell. The obtained results have been analyzed based on the above four criteria. We revealed the optimum and intolerable modes of thermo-mechanical processing, which enabled undesirable changes in products. The required degree of deformation and temperature of the post-deformation heating have been found for each steel under study. As a result, recommendations for industrial enterprises have been drawn up.

© PNRPU

Введение

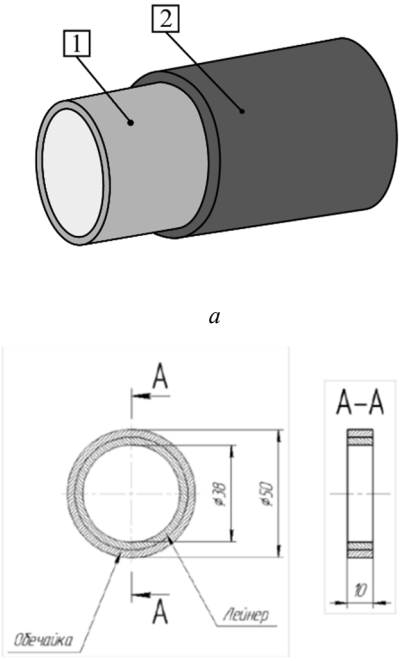
В многолетней практике нефтедобычи наиболее широко используются конструкции скважинного штангового насоса (СШН) [1; 2]. В России СШН-установками оборудовано около 49 % всех действующих скважин. К сведению, в США – 90 %, в ООО «ЛУКОЙЛ-Пермь» – 71 % [3]. Поэтому создание конкурентоспособного производства СШН, обеспечивающего их преимущество по качеству и долговечности, является важной задачей повышения эффективности (ТЭК) и энергетической безопасности [4; 5]. Для изготовления плунжерных насосов нефтедобывающей промышленности используется длинномерный тонкостенный биметаллический цилиндр, состоящий из обечайки и лейнера [6; 7] (рис. 1), соединенных методом холодной радиальной ковки (ХРК) [8–11]. На современном рынке материалов для изготовления обечайки и лейнера данной продукции более широкое распространение получили марки сталей 45 и 38Х2МЮА соответственно. Для обеспечения износостойкости внутренней поверхности цилиндра лейнер подвергается ионно-плазменному азотированию (ИПА) [12–14]. С целью повышения эксплуатационных характеристик в качестве альтернативы для материала лейнера были исследованы стали 12Х18Н10Т (ГОСТ 9941–81) и 15Х5М (ГОСТ 550–75) [15]. Постдеформационный нагрев изделия приводит к короблению длинномерных тонкостенных цилиндров и отделению лейнера от обечайки. Одной из главных причин возникновения данных дефектов является величина внутренних напряжений изделия [16; 17].

1. Цель работы и материалы исследования

Целью данной работы является определение остаточных напряжений в полых цилиндрических образцах после радиальной ковки и последующего отжига (ложного азотирования) для выявления оптимальных режимов обработки. Поскольку исходные изделия имеют большую длину, работа с ними не представляется возможной. Поэтому от каждого длинномерного биметаллического цилиндра было отрезано небольшое кольцо, являющееся представительным для всего изделия. Частота, с которой происходит радиальная ковка, достаточно велика, чтобы можно было считать, что изделие получается достаточно однородным по длине. Таким образом, исследуемые образцы представляют собой два коаксиальных цилиндра: обечайка (внешний) и лейнер (внутренний) (рис. 1, *а*). Геометрические параметры образцов представлены на рис. 1, *b*.

Исследования проводились на биметаллических образцах с лейнером из стали: 38Х2МЮА, 15Х5М, 12Х18Н10Т – после различных вариантов обработки. Варьировались такие факторы, как шероховатость внешней поверхности лейнера, степень деформации при ХРК и температура постдеформационного нагрева. Шерохо-

ватость поверхности менялась за счет различной механической обработки материала лейнера для обеспечения адгезии биметалла. Вариации обработки были зашифрованы в код маркировки (рис. 2).



a

b

Рис. 1. Образец биметаллической НКТ: *a* – внешний вид цилиндра: *1* – лейнер (внутренняя часть); *2* – обечайка (внешняя часть), *b* – эскиз исследуемых образцов

Fig. 1. Bimetallic pipe sample: *a* – view of the cylinder: *1* – leiner (inner part); *2* – shell (outer part), *b* – sketch of the studied samples

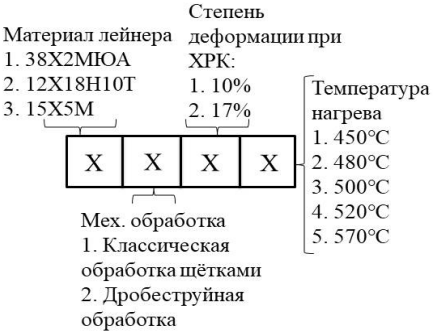


Рис. 2. Расшифровка кода маркировки исследуемых образцов

Fig. 2. Decoding of the labelling code of the tested samples

2. Методика определения остаточных напряжений

Для определения остаточных напряжений существует множество экспериментальных способов: химические, рентгенографические, магнитные, поляризационно-оптические, термические и механические. Первые четыре группы методов не применяются в рамках настоящего исследования. Термические методы подразумевают отжиг образцов, что приведёт к ликвидации текущего структурного состояния. Это недопустимо ввиду необходимости проведения структурных исследований на имеющихся образцах. Многие механические методы связаны с послойным удалением части материала на исследуемых образцах [18–21]. Данные методы также неприменимы, так как ведут к полному уничтожению исследуемых образцов. Кроме того, такие методы требуют больших временных затрат.

В настоящей работе рассмотрено определение остаточных напряжений по перемещениям, измеренным после разрезания образцов (колец), вырезанных из длинномерных биметаллических труб, по образующей. Наиболее подходящими являются методы разрезки колец [22]. Однако формулы, полученные в известных работах, либо допускают очень сильные гипотезы, не выполняющиеся в нашем случае, либо содержат подгоночные константы, которые необходимо определять экспериментальным путём, что крайне неудобно или невозможно. В работах [23–27] предложен метод, позволяющий определять все компоненты тензора остаточных напряжений и их распределение по пространственным координатам. Однако при выводе формул [26] выдвигаются определённые гипотезы о пластическом деформировании, послужившем причиной появления остаточных напряжений, которые могут не выполняться в нашем случае. Кроме того, предложенный метод [23] подразумевает, что известно касательное остаточное напряжение в поверхностном слое трубы. Данное напряжение должно быть измерено каким-то иным методом. Данный факт делает методику [23] зависимой от других методик. В связи с этим было решено вывести новые формулы для определения напряжений в данной постановке.

Так как остаточные напряжения должны быть упругими, для их нахождения с использованием измерений из эксперимента необходимо решить соответствующую задачу в рамках теории упругости.

В постановке задачи линейной теории упругости [28] выполняется уравнение равновесия (1):

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = 0, \tag{1}$$

где $\boldsymbol{\sigma}$ – тензор напряжений, $\nabla \cdot (\cdot)$ – дивергенция функции.

Для связи напряжений и деформаций (определяющее соотношение) применяется изотропный закон Гука:

$$\boldsymbol{\sigma} = \lambda \left(\boldsymbol{\varepsilon} : \mathbf{I} \right) \mathbf{I} + 2G\boldsymbol{\varepsilon}, \tag{2}$$

где λ и G – упругие константы материала (константы Ламе), $\boldsymbol{\varepsilon}$ – тензор деформаций, $\boldsymbol{I}$ – единичный тензор, «:» – операция двойного скалярного произведения.

Для связи тензора деформаций и вектора перемещений используется геометрическое уравнение:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \frac{1}{2}\left(\nabla u + \nabla u^T \right), \tag{3}$$

где u – вектор перемещений, $\nabla (\cdot)$ – набла-оператор (оператор градиента), $(\cdot)^T$ – операция транспонирования.

Для решения задачи теории упругости в перемещениях сначала находится градиент вектора перемещений, затем он подставляется в геометрическое уравнение. Из полученного тензора деформаций находится тензор напряжений, от которого берется дивергенция. Результат – это система, состоящая из трех дифференциальных уравнений в частных производных второго порядка относительно компонент вектора перемещений (уравнения Ламе).

В силу особенностей геометрии задачи удобно рассматривать постановку в цилиндрической системе координат (ЦСК). В общем случае вектор перемещений содержит три компоненты, каждая из которых является функцией трёх координат:

$$\boldsymbol{u} = \left\{u_r\left(r,\varphi,z\right), u_\varphi\left(r,\varphi,z\right), u_z\left(r,\varphi,z\right)\right\}. \tag{4}$$

Исходя из полученных экспериментальных измерений, можно выдвинуть гипотезу, что вектор перемещений имеет следующий вид:

$$\boldsymbol{u} = \left\{u_r\left(r\right), 0, u_z\left(\varphi\right)\right\}, \tag{5}$$

т.е. имеет только две ненулевых компоненты, каждая из которых зависит только от одной пространственной координаты. Результаты эксперимента показывают, что компонента u_r зависит также и от координаты z, однако в таком случае итоговая система уравнений не будет иметь простого аналитического решения. Поэтому зависимость от координаты z будет учитываться усреднением.

Оператор градиента для вектора в ЦСК вычисляется по правилу:

$$\nabla \boldsymbol{f} = \begin{pmatrix} \dfrac{\partial f_r}{\partial r} & \dfrac{\dfrac{\partial f_r}{\partial \varphi} - f_\varphi}{r} & \dfrac{\partial f_r}{\partial z} \\ \dfrac{\partial f_\varphi}{\partial r} & \dfrac{\dfrac{\partial f_\varphi}{\partial \varphi} + f_r}{r} & \dfrac{\partial f_\varphi}{\partial z} \\ \dfrac{\partial f_z}{\partial r} & \dfrac{\dfrac{\partial f_z}{\partial \varphi}}{r} & \dfrac{\partial f_z}{\partial z} \end{pmatrix}, \tag{6}$$

следовательно, тензор деформаций, учитывая наши предположения, принимает следующий вид:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{rr} & \varepsilon_{r\varphi} & \varepsilon_{rz} \\ \varepsilon_{r\varphi} & \varepsilon_{\varphi\varphi} & \varepsilon_{\varphi z} \\ \varepsilon_{rz} & \varepsilon_{\varphi z} & \varepsilon_{zz} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dfrac{\partial u_r}{\partial r} & 0 & 0 \\ 0 & \dfrac{u_r}{r} & \dfrac{\dfrac{\partial u_z}{\partial \varphi}}{2r} \\ 0 & \dfrac{\dfrac{\partial u_z}{\partial \varphi}}{2r} & 0 \end{pmatrix}, \tag{7}$$

а тензор напряжений соответственно:

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_{rr} & \sigma_{r\varphi} & \sigma_{rz} \\ \sigma_{r\varphi} & \sigma_{\varphi\varphi} & \sigma_{\varphi z} \\ \sigma_{rz} & \sigma_{\varphi z} & \sigma_{zz} \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} \left(\lambda+2G\right)\dfrac{\partial u_r}{\partial r} + \lambda\dfrac{u_r}{r} & 0 & 0 \\ 0 & \left(\lambda+2G\right)\dfrac{u_r}{r} + \lambda\dfrac{\partial u_r}{\partial r} & G\dfrac{\dfrac{\partial u_z}{\partial \varphi}}{r} \\ 0 & G\dfrac{\dfrac{\partial u_z}{\partial \varphi}}{r} & \lambda\left(\dfrac{u_r}{r} + \dfrac{\partial u_r}{\partial r}\right) \end{pmatrix}. \tag{8}$$

Дивергенция для тензора второго ранга в ЦСК вычисляется по правилу:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{F} = \begin{Bmatrix} \dfrac{\partial F_{rz}}{\partial z} + \dfrac{\partial F_{rr}}{\partial r} + \dfrac{\dfrac{\partial F_{r\varphi}}{\partial \varphi} + F_{rr} - F_{\varphi\varphi}}{r} \\ \dfrac{\partial F_{\varphi z}}{\partial z} + \dfrac{\partial F_{\varphi r}}{\partial r} + \dfrac{\dfrac{\partial F_{\varphi\varphi}}{\partial \varphi} + F_{\varphi r} + F_{r\varphi}}{r} \\ \dfrac{\partial F_{zz}}{\partial z} + \dfrac{\partial F_{zr}}{\partial r} + \dfrac{\dfrac{\partial F_{z\varphi}}{\partial \varphi} + F_{zr}}{r} \end{Bmatrix}, \tag{9}$$

тогда уравнение равновесия принимает вид:

$$\nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} = \begin{Bmatrix} \left(\lambda+2G\right)\dfrac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \dfrac{\left(\lambda+2G\right)\dfrac{\partial u_r}{\partial r}}{r} - \dfrac{\left(\lambda+2G\right)u_r}{r^2} \\ 0 \\ G\dfrac{\dfrac{\partial^2 u_z}{\partial \varphi^2}}{r^2} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{Bmatrix}. \tag{10}$$

В правой части уравнения стоит 0, следовательно левую часть можно разделить на упругие константы, а третью строку умножить на r^2, такие преобразования не влияют на решение. В итоге получается два независимых дифференциальных уравнения:

$$\frac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \frac{\dfrac{\partial u_r}{\partial r}}{r} - \frac{u_r}{r^2} = 0 \;\text{ и }\; \frac{\partial^2 u_z}{\partial \varphi^2} = 0\,. \tag{11}$$

Для получения единственного решения каждое из уравнений необходимо дополнить граничными условиями. Необходимо рассмотреть каждый случай по отдельности.

На рис. 3 изображено кольцо после разреза. Кольцо имеет внутренний и внешний радиусы (в дальнейшем будем обозначать их с индексами min и max соответственно).

В силу того, что расстояние, на которое расходится кольцо, мало по сравнению с его радиусом, принимается, что величина расхождения (хорда соответствующей

окружности) равна длине дуги над хордой. Следовательно, радиальные перемещения находятся через увеличение диаметра (радиуса) кольца после разреза. Длина окружности равна:

$$c = \pi d\,, \tag{12}$$

где d – диаметр.

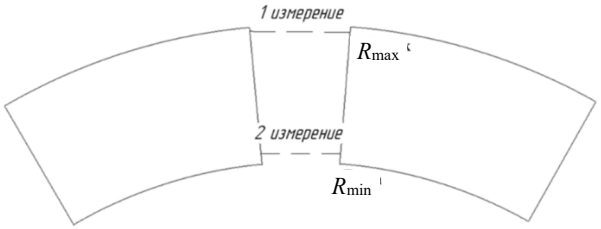


Рис. 3. Расхождение кольца после разреза

Fig. 3. Divergence of the ring after cutting

После разреза длина окружности равна:

$$C = \pi d + l = \pi D\,,$$

где l – измеренное расстояние (рис. 2) за вычетом l_0 – ширины среза. l может быть как больше, так и меньше нуля в зависимости от поведения разрезанного кольца. D – диаметр после разреза. Изменение диаметра принимает вид:

$$D - d = \frac{l}{\pi}\,. \tag{13}$$

При замене диаметров на радиусы выражение принимает вид:

$$R_{max} - r_{max} = \frac{l_{max}}{2\pi} \text{ и } R_{min} - r_{min} = \frac{l_{min}}{2\pi}\,, \tag{14}$$

где $l_{\max}$ – это «измерение 1» (см. рис. 2) за вычетом l_0, а $l_{\min}$ – это «измерение 2» (см. рис. 2) за вычетом l_0. Так как значения $l_{\max}$ и $l_{\min}$ различны с разных сторон разрезанных колец, в дальнейшем будет подразумеваться под величинами $l_{\max}$ и $l_{\min}$ среднее арифметическое между их значениями с двух сторон, т.е. значение $l_{\max}$ и $l_{\min}$ посередине толщины кольца (по координате z).

Уравнение для радиальных перемещений и граничные условия имеют вид:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial^2 u_r}{\partial r^2} + \dfrac{\dfrac{\partial u_r}{\partial r}}{r} - \dfrac{u_r}{r^2} = 0, \\ u_r\left(r_{\min}\right) = \dfrac{l_{\min}}{2\pi}, \\ u_r\left(r_{\max}\right) = \dfrac{l_{\max}}{2\pi}, \end{cases} \tag{15}$$

а его решение:

$$u_r\left(r\right) = \frac{r^2 r_{\min} l_{\min} - r_{\min} r_{\max}^2 l_{\min} - r^2 r_{\max} l_{\max} + r_{\min}^2 r_{\max} l_{\max}}{2\pi r\left(r_{\min}^2 - r_{\max}^2\right)}\,. \tag{16}$$

Подставляя полученное решение в выражение для тензора напряжений, получаем формулу для вычисления компоненты σ_{rr}:

$$\sigma_{rr} = \frac{\left(G+\lambda\right)\left(r_{\min} l_{\min} - r_{\max} l_{\max}\right)}{\pi\left(r_{\min}^2 - r_{\max}^2\right)} + \\ + \frac{G\left(r_{\min} r_{\max}^2 l_{min} - r_{\min}^2 r_{\max} l_{\max}\right)}{\pi r^2\left(r_{\min}^2 - r_{\max}^2\right)}. \tag{17}$$

При расчётах по данной формуле значение $r = (r_{\min} + r_{\max})/2$, что соответствует радиусу лейнера или обечайки.

На рис. 4 схематически изображён сдвиг вдоль оси z.

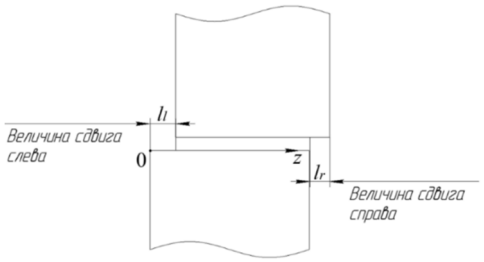


Рис. 4. Сдвиг кольца после разреза

Fig. 4. Shifting the ring after cutting

Обозначим за l_l и l_r величины сдвига слева и справа соответственно. Тогда второе уравнение с граничными условиями принимает вид:

$$\begin{cases} \dfrac{\partial^2 u_z}{\partial \varphi^2} = 0, \\ u_z\left(0\right) = l_l - l_r, \\ u_z\left(2\pi\right) = l_r, \end{cases} \tag{18}$$

а его решение:

$$u_z\left(\varphi\right) = \frac{2\pi\left(l_l - l_r\right) + \varphi\left(2l_r - l_l\right)}{2\pi}\,. \tag{19}$$

При подстановке полученного решения в выражение для тензора напряжений получается формула для вычисления компоненты $\sigma_{\varphi z}$:

$$\sigma_{\varphi z} = G\frac{2l_r - l_l}{2\pi r}\,. \tag{20}$$

При расчётах по данной формуле значение $r = (r_{\min} + r_{\max})/2$, что соответствует радиусу лейнера или обечайки.

3. Результаты и их обсуждение

Для расчёта напряжений используются следующие значения упругих характеристик для исследуемых материалов [29; 30]: сталь 38Х2МЮА: λ = 100 ГПа, G = 82 ГПа; сталь 12Х18Н10Т: λ = 103 ГПа, G = 77 ГПа; сталь 15Х5М: λ = 98 ГПа, G = 83 ГПа; сталь45: λ = 101 ГПа, G = 78 ГПа.

В некоторых случаях полученные напряжения оказываются выше предела текучести соответствующего материала. Это объясняется, например, перераспределением напряжений, которое происходит в процессе разрезания, или ситуациями, связанными с макроскопическим разрушением в процессе разрезания, а также – вторичными пластическими деформациями, появляющимися в процессе разгрузки.

Можно сформулировать несколько критериев для оптимизации термомеханической обработки в рамках исследуемой задачи. В настоящей работе рассматриваются четыре критерия: 1) минимальные значения остаточных напряжений в цилиндре; 2) минимальная разница напряжений между обечайкой и лейнером; 3) минимальные отклонения размеров лейнера; 4) максимальные значения адгезии между лейнером и обечайкой. Для уменьшения объема данных в табл. 1 представлены результаты с наилучшими характеристиками.

Первым критерием является требование того, чтобы остаточные напряжения в цилиндре были минимальными. Математически такой критерий выражается соотношением: $|\sigma_{тг}^{Об}|+|\sigma_{тг}^{Лей}|$ – сумма модулей напряжений в обечайке и соответствующем лейнере должна быть минимальна. Результаты отбора по первому критерию представлены в табл. 2.

Вторым критерием является разница напряжений между обечайкой и лейнером. Подходящими являются те ситуации, когда напряжения в обечайке и лейнере имеют одинаковый знак и разница между ними небольшая. Ситуации с разными знаками благоприятны в случае, если у обечайки «минус», а у лейнера «плюс», и нежелательны в обратном случае. Порядок при оценке по данному критерию представлен в табл. 3.

Таблица 1

Результаты отбора образцов с наилучшими характеристиками

Table 1

Results of selection of samples with the best characteristics

Шифр	$\sigma_{адг}$, кН/м^2	Обечайка $\sigma_{тг}$, МПа	Лейнер $\sigma_{тг}$, МПа
1215	3876	-62	5
1214	7012	10	-98
3124	742	12	-159
1213	2137	-107	98
3214	979	7	-370
1124	664	201	-374
1225	1983	167	-214
3215	766	-140	-298
1123	1045	-12	-616
1224	3388	36	-838
3114	1344	601	-380
2214	497	-641	-591

Таблица 2

Результаты отбора образцов по первому критерию

Table 2

Results of sampling according to the first criterion

Параметр	Значение											
Номер образца	1215	1214	3124	1213	3214	1124	1225	3215	1123	1224	3114	2214
$\|\sigma_{тг}^{Об}\|+\|\sigma_{тг}^{Лей}\|$, МПа	67	108	171	205	377	380	381	438	759	874	981	1232

Таблица 3

Результаты отбора образцов по второму критерию

Table 3

Results of sampling according to the second criterion

Параметр	Значение											
Номер образца	2214	1215	1214	3215	3124	1213	3214	1225	1124	1123	1224	3114
$\|\sigma_{тг}^{Об}-\sigma_{тг}^{Лей}\|$, МПа	50	67	108	158	171	205	377	381	575	604	874	981

Таблица 4

Результаты отбора образцов по третьему критерию

Table 4

Results of sampling according to the third criterion

Номер образца	1214	1215	1123	1124	1213	3214	1125	3114	3124	1224	2214	3215
$r_{нач} - r_{кон}$, мкм	56	56	59	67	166	176	186	214	225	324	345	396

Третьим критерием является изменение внутреннего диаметра лейнера после термической обработки, так как геометрия биметаллического цилиндра серьезно контролируется, и допускаются отклонения до 0,01 мм. Результат анализа по третьему критерию представлен в табл. 4.

Четвёртым критерием является значение адгезии между лейнером и обечайкой. Расчет адгезионной прочности проводился на цилиндрических образцах длиной 50 мм методом сдвига лейнера. Значение $\sigma_{адг}$ рассчитывалась как отношение усилия сдвига к площади поверхности контакта обечайки и лейнера. Экспериментально было выяснено, что данное значение должно составлять не менее 700 кН/м^2 (0,7 МПа).

В табл. 4 приведены только подходящие варианты из-за большого объема данных. Вариант № 2214 стал исключением, так как 700 кН/м^2 – это величина с запасом (без запаса – 400 кН/м^2).

Таким образом, по всем четырём критериям оптимальными вариантами являются образцы с маркировками 1214 и 1215. Они имеют минимальные по модулю напряжения, небольшое изменение диаметра лейнера и высокий уровень адгезии. Допустимыми являются все экземпляры, представленные в таблице, так как каждый из них является локальным оптимумом среди конкретного материала и способа обработки. Кроме того, в каждом из этих случаев отсутствует сдвиговое остаточное напряжение.

Заключение

Представлены результаты выбора наиболее оптимальных способов термомеханической обработки биметаллических труб плунжерного насоса для различных материалов. Описанная методика позволяет оценивать внутренние напряжения биметаллических цилиндров, что дает возможность определить наиболее эффективный технологический цикл производства изделия. В результате проведенного исследования оптимальными режимами обработки биметаллических цилиндров, обеспечивающими высокий уровень адгезии, минимальные остаточные напряжения и небольшое изменение геометрии лейнера, являются: сталь 38Х2МЮА с дробеструйной обработкой, степенью деформации 10 %, температурами постдеформационного нагрева 520 и 570 °С; сталь 15Х5М после классической обработки щётками, со степенями деформации 10 и 17 %, температурой нагрева 520 °С, а также после дробеструйной обработки; ХРК со степенью деформации 10 % и температурами постдеформационного нагрева 520 и 570 °С. Показано, что коррозионно-стойкая сталь 12Х18Н10Т имеет весьма большой уровень напряжений в обечайке и лейнере. Рекомендуемый вариант обработки для реализации в производстве этой стали – дробеструйная обработка, степень деформации при ХРК 10 % и температурой постдеформационного нагрева 520 °С.

Библиографический список

1. Бойко В.С. Разработка и эксплуатация нефтяных месторождений: учеб. для вузов. – М.: Недра, 1990. – 427 с.
2. Бухаленко Е.И. Нефтепромысловое оборудование: справ. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Недра, 1990. – 559 с.
3. Лучшие насосы для нефтяного дела // Техсовет. – 2006. – № 11. – С. 98.
4. Бушуев В.В. Энергетическая безопасность России. – Новосибирск: Наука, 1998. – 302 с.
5. Санникова И.Н. Анализ энергетической безопасности России // Экономика. Профессия. Бизнес. – 2017. – № 3. – С. 65–70.
6. Мищенко И.Т. Скважинная добыча нефти. – М.: Нефть и газ, 2003. – 816 с.
7. Уразаков К.Р. Справочник по добыче нефти. – М.: Недра-Бизнесцентр, 2000. – 371 с.
8. Структурообразование конструкционной низкоуглеродистой стали при комплексной механотермической обработке на этапе холодной пластической деформации методом радиальной ковки / А.Н. Балахнин, Р.А. Вагин, Д.О. Панов, А.И. Смирнов, Н.А. Морева // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – № 3 (56). – С. 92–94.
9. Механические свойства конструкционной низкоуглеродистой стали 10Х3Г3МФ после холодной пластической деформации методом радиальной ковки / А.Н. Балахнин, Д.А. Костюк, Д.О. Панов, А.А. Никулина, Ю.Н. Ромашова // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2012. – № 3 (56). – С. 64–66.
10. Влияние холодной пластической деформации методом радиальной ковки и последующей термической обработки на структуру и свойства стали 10Х3Г3МФ / А.Н. Балахнин, Д.О. Панов, М.Г. Титова, А.С. Перцев, А.И. Смирнов, Ю.Н. Симонов // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2012. – № 11 (689). – С. 22–27.
11. Эволюция структуры и механических свойств низкоуглеродистого мартенсита при холодной радиальной ковке и последующей термической обработке / А.Н. Балахнин, Д.О. Панов, А.С. Перцев, А.И. Смирнов, Ю.Н. Симонов // Материаловедение. – 2015. – № 2. – С. 19–26.
12. Поболь И.Л. Ионное азотирование поверхности отверстий в длинномерных изделиях из сталей // Вестник Брестского государственного технического университета. 2019 – № 4. – С. 25–30.
13. Арзамасов Б.Н. Химико-термическая обработка металлов в активизированных газовых средах. – М.: Машиностроение, 1979. – 224 с.
14. Гольдштейн М.И., Грачев С.В., Векслер Ю.Г. Специальные стали – 2-е издание переработанное и дополненное – М.: МИСиС, 1999. – 405 с.
15. Решение задачи кастомизации биметаллических цилиндров нефтепромыслового оборудования / О.В. Силина, Е.С. Лобова, С.П. Ковко, Е.О. Бабкин, Р.М. Полежаев, М.Н. Босяков // Проблемы машиностроения и автоматизации, 2023. – № 1. – С. 25–33.
16. Тюрин В.А. Ковка на радиально-обжимных машинах. – М.: Машиностроение, 1990. – 256 с.

17. Дедюлина О.К., Салищев Г.А. Формирование ультрамелкозернистой структуры в среднеуглеродистой стали 40ХГНМ ротационной ковкой и ее влияние на механические свойства // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 1. – С. 701–706.

18. Соколов И.А., Уральский В.И. Остаточные напряжения и качество металлопродукции // Металлургия. – 1981. – С. 96.

19. Биргер И.А. Остаточные напряжения. – М.: Машгиз, 1963. – С. 232.

20. Хоргер О., Нейферт Г. Влияние остаточных напряжений на усталостную прочность машин и смежных явлений. Остаточные напряжения / под ред. В.Р. Осгуда. – М.: Изд. иностранной литературы, 1957. – С. 243–280.

21. Гликман А.А., Бабаев А.Н. Рациональное применение способа Закса при определении остаточных напряжений в сплошных и полых цилиндрах // Заводская лаборатория. – 1956. – № 4. – С. 466–472.

22. Давиденков Н.Н. Избранные труды. – Киев: Наукова думка, 1981. – 655 с.

23. Пат. РФ № 2366912 С1. Способ определения остаточных напряжений / Г.Л. Колмогоров, Е.В. Кузнецова; № 2008111436/28; заяв. 24.03.2008; опубл. 10.09.2009.

24. Кузнецова Е.В., Колмогоров Г.Л., Вавель А.Ю. Технологические остаточные напряжения при производстве циркониевых листов // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 2016. – № 1. – С. 26–31. DOI: 10.17073/0021-3438-2016-1-26-31

25. Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В. Метод расчета предельных технологических остаточных напряжений в трубной заготовке // Деформация и разрушение материалов. – 2016. – № 7. – С. 2–5.

26. Колмогоров Г.Л., Кузнецова Е.В. Технологические остаточные напряжения после обработки металлов давлением // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Металлургия. – 2016. – Т. 16, № 1. – С. 41–45. DOI: 10.14529/met160105

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

28. Лурье А.И. Теория упругости. – М.: Наука, 1970. – 940 с.

29. Фролов К.В. Энциклопедия. Т. II-2: Стали, Чугуны. – М.: Машиностроение, 2001. – 780 с.

30. Кикоин И.К. Таблицы физических величин. – М.: Атомиздат, 1976. – 1008 с.

References

1. BoikoV.S. Razrabotka i ekspluataciya neftyanyh mestorozhdeniy [Reservoir engineering]. Moscow, *Nedra*. – 1990. – 427 p. (in Russian).

2. Bukhalenko E.I. Neftepromyslovoe oborudovanie [Oilfield-equipment]. *Referencebook.* 2nd ed. Moscow, *Nedra*, 1990. – 559 p. (in Russian).

3. Luchshie nasosy dly aneftyanogo dela [Best pumps for oil industry]. *Techsovet*, 2006, no. 11. – P. 98.(in Russian).

4. Bushuyev V.V. Energeticheskaya bezopasnost Rossii [Energy security of Russia]. Novosibirsk, *Nauka*, 1998. – 302 p. (in Russian).

5. Sannikova I.N. Analiz energeticheskoy bezopasnosti Rossii [Energy security analysis in Russia: current situation, problems, prospects]. *Ekonomika. Professiya. Biznes*, 2017, no. 3. – P. 65-70 (in Russian).

6. Mishchenko I.T. Skvazhinnaya dobycha nefti [Borehole oil production]. Moscow, *Gubkin University*, 2003. – 816 p. (in Russian).

7. Urazakov K.R. Spravochnik po dobyche nefti [Reference book on oil production]. Moscow, *Nedra-Biznestsentr*, 2000. – 371 p. (in Russian).

8. Balakhnin A.N., Vagin R.A., Panov D.O., Smirnov A.I., Moreva N.A. Strukturoobrazovanie konstrukcionnoy nizkouglerodistoy stali pri kompleksnoy mekhano-termicheskoy obrabotke na etape holodnoy plasticheskoy deformacii metodom radialnoy kovki [Research of structure formation of constructional low carbon steel by integrated thermo-mechanical method in the radial forging machine's deformation stage]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty*, 2012, no. 3 (56). – P. 92-94 (in Russian).

9. Balakhnin A.N., Kostuk D.A., Panov D.O., Nikulina A.A., Romashova Y.N. Mekhanicheskie svoystva konstrukcionnoy nizkouglerodistoy stali 10Cr3Mn3MoV posle holodnoy plasticheskoy deformacii metodom radialnoy kovki [Mechanical properties of constructional low carbon steel 10Cr3Mn3MoV after cold plastic deformation by radial forging method]. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty*, 2012, no. 3 (56). – P. 64-66 (in Russian).

10. Balakhnin A.N., Panov D.O., Titova M.G., Pertsev A.S., Smirnov A.I., Simonov Y.N. Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov [Effect of cold plastic deformation by radial forging followed by heat treatment on the structure and properties of steel 10KH3G3MF]. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2012, no. 11 (689). – P. 22-27 (in Russian).

11. Balakhnin A.N., Panov D.O., PertsevA.S., Smirnov A.I., Simonov Y.N. Evolyuciya struktury i mekhanicheskih svoystv nizkouglerodistogo martensita pri holodnoy radialnoy kovke i posleduyushchey termicheskoy obrabotke [Evolution of structure and mechanical properties of low-carbon martensite under cold radial forging and thermal treatment]. *Materialovedenie*, 2015, no. 2. – P. 19-26 (in Russian).

12. Pobol I.L. Ionnoe azotirovanie poverhnosti otverstiy v dlinnomernyh izdeliyah iz staley [Ion nitriding of workhole surfaces in the long-length steel parts]. *Vestnik Brestskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2019, no. 4. – P. 25-30 (in Russian).

13. Arzamasov B.N. Himiko-termicheskaya obrabotka metallov v aktivizirovannyh gazovyh sredah [Chemical-thermal treatment of metals inactivated gas media]. Moscow, *Mashinostroyeniye*, 1979. – 224 p. (in Russian).

14. Goldshtein M.I., Grachev S.V., Veksler Y.G. Specialnye stali [Special steels]. 2nd ed. Moscow: *MISiS*, 1999. – 405 p. (in Russian).

15. Silina O.V., Lobova E.S., Kovko S.P., Babkin E.O., Polezhaev R.M., Bosyakov M.N. Reshenie zadach kastomizacii bimetallicheskih cilindrov neftepromyslovogo oborudovaniya, Problemy mashinostroeniya i avtomatizacii [Solving the problem of customization of bimetallic cylinders for oilfield equipment]. *Problemy mashinostroyeniya i avtomatizatsii*, no. 1, 2023. – P. 25-33 (in Russian).

16. TyurinV.A. Kovka na radialno-obzhimnyh mashinah [Forging by radial clamping machines]. Moscow, *Mashinostroyeniye*, 1990. – 256 p.(in Russian).

17. Dedyulina O.K., Salishev G.A. Formirovanie ultramelkozernistoy struktury v sredneuglerodistoy stali 40CrMnNiMo

rotacionnoy kovkoy i ee vliyanie na mekhanicheskie svoystva [Formation of ultrafine-grained structure in medium-carbon steel 40HGNM by swaging and its influence on mechanical properties]. *Fundamental'nye issledovaniya,* 2013, no. 1. – P. 701-706 (in Russian).

18. Sokolov I.A., Uralsky V.I. Ostatochnye napryazheniya i kachestvo metalloprodukcii [Residualstresses and metal products quality]. *Metallurgiya*, 1981. – 96 p.(in Russian).

19. Birger I.A. Ostatochnye napryazheniya [Residual stresses], *Mashgiz*, 1963. – 232 p. (in Russian).

20. Horger O., Neufert H. Vliyanie ostatochnyh napryazheniy na ustalostnuyu prochnost mashin i smezhnyh yavleniy, Ostatochnye napryazheniya. [Effects of residual stresses on fatigue strength of machines and related processes. Residual stresses]. Moscow, *Izdatelstvo inostrannoy literatury*, 1957. – P. 243–280 (in Russian).

21. Glikman A.A., Babaev A.N. Racionalnoe primenenie sposoba Zaksa pri opredelenii ostatochnyh napryazheniy v sploshnyh i polyh cilindrah [Practical application of the Sachs method in assessingresidual stresses in solid and hollowcylinders]. *Zavodskaya laboratoriya*, 1956, no. 4. – P. 466-472(in Russian).

22. Davidenkov N.N. Izbranny`e trudy` [Selected works]. Kiev: *Naukova dumka*, 1981. – 655 p. (in Russian).

23. Kolmogorov G.L., Kuznetsova E.V. RF Pat. no. 2366912 C1. Sposob opredeleniya ostatochnyh napryazheniy [Method to reveal residual stresses] / no. 2008111436/28; submitted 24.03.2008; published 10.09.2009.

24. Kuznetsova E.V., Kolmogorov G.L., Vavel' A.Y. Tekhnologicheskie ostatochnye napryazheniya pri proizvodstve cirkonievyh listov [Manufacturing residual stresses during the production of zirconium sheets]. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*., 2016, Vol. 57, No. 2. – P. 101-105. DOI: 10.3103/S1067821216020073

25. Kolmogorov G.L., Kuznetsova E.V. Metod rascheta predelnyh tekhnologicheskih ostatochnyh napryazheniy v trubnoy zagotovke [Method for calculating the limiting technological residual stresses in a tubular billet]. *Deformation and destruction of materials*, 2016, No. 7. – P. 2-5.

26. Kolmogorov G.L., Kuznetsova E.V. Tekhnologicheskie ostatochnye napryazheniya posle obrabotki metallov davleniem [Technological residual stresses after metal forming] // *Bulletin of the soutnural state university. Series Metallurgy*., 2016, Vol. 16, No. 1. – P. 41-45. DOI: 10.14529/met160105

27. Kolmogorov G.L., Kuznetsova E.V., Khabarova D. Relaksaciya ostatochnyh napryazheniy i tochnost trubnyh metalloizdeliy [Relaxation of residual stresses and precision of steel pipes] // *Bulletin of Nosov Magnitogorsk state technical university*., 2018, Vol. 16, No. 3. – P. 103-108. DOI: 10.18503/1995-2732-2018-16-3-103-108

28. Lurye A.I. Teoriya uprugosti [Theory of Elasticity], Moscow, *Nauka*, 1970. – 940 p. (in Russian).

29. Frolov K.V. Enciklopediya. T. II-2: Stali, Chuguny [Encyclopedia.Vol. II-2: Steels, castirons]. Moscow, *Mashinostroenie*, 2001. – 780 p. (in Russian).

30. Kikoin I.K. Tablicy fizicheskih velichin [Tables of physical values]. Moscow, *Atomizdat*, 1976. – 1008 p. (in Russian).

Финансирование. Работа выполнена при финансовой поддержке Правительства Пермского края в рамках научного проекта № С 26/513.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад авторов равноценен.

Funding. The work was carried out with financial support from the Government of the Perm Territory within the framework of scientific project No. C 26/513.

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

The contribution of the authors is equivalent.