

УДК 621.774.3

Г.М. Журавлев, д-р техн. наук, профессор, Тульский государственный университет (Тула, Россия) (e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru)

А.Е. Гвоздев, д-р техн. наук, профессор, Тульский государственный педагогический университет им. Л.Н. Толстого (Тула, Россия) (e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru)

А.А. Калинин, инженер, Тульский государственный университет (Тула, Россия) (e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru)

О.В. Кузовлева, канд. техн. наук, доцент, Тульский государственный университет (Тула, Россия) (e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru)

Е.В. Агеев, д-р техн. наук, доцент, ФГБОУ ВО «Юго-Западный государственный университет» (Курск, Россия) (e-mail: ageev_ev@mail.ru)

Е.А. Гречишкин, аспирант, Тульский государственный университет (Тула, Россия) (e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru)

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПРОКАТКИ ТРУБ ИЗ АНИЗОТРОПНОГО МАТЕРИАЛА

Процесс прокатки труб при одновременном существенном изменении диаметра и толщины трубы осуществляется на оправке. В очаге пластической деформации имеет место плоское напряженное и плоское деформированное состояния трубы. Зона плоского напряженного состояния характеризуется наличием двух участков: участок пространственного изгиба до контакта с валком и участок, контактирующий с цилиндрической поверхностью вала. Предполагается, что материал трубной заготовки не сжимаем, обладает цилиндрической анизотропией механических свойств, анизотропно упрочняющийся, для которого справедливо условие текучести Мизеса-Хилла и ассоциированный закон пластического течения.

В работе рассмотрено распределение напряжений на участках зоны плоского напряженного состояния. Для учета анизотропного упрочнения материала была учтена информация о распределении деформаций в очаге пластической деформации. Рассмотрен вопрос о распределении напряжений в зоне плоского деформированного состояния зоны пластической деформации. В работе принято, что в зоне реализуется радиальное течение материала, а на контактных границах заготовки и инструмента реализуется закон трения Кулона. Изменение направления течения материала при входе и выходе из зоны учитывается путем коррекции радиального напряжения с учетом разрыва касательной составляющей на границе очага деформации по методу баланса работ. Полученные выражения для определения деформаций и напряжений позволяют осуществить анализ процесса прокатки труб на оправке с учетом анизотропии материала. Полученные результаты могут быть использованы при создании ресурсосберегающих технологий обработки металлических материалов с использованием новых различных наноконпозиционных смазок и покрытий.

Ключевые слова: производство бесшовных труб прокаткой, цилиндрическая анизотропия механических свойств материала, напряженно-деформированное состояние.

DOI: 10.21869/2223-1560-2017-21-4-75-87

Ссылка для цитирования: Исследование процесса прокатки труб из анизотропного материала / Г.М. Журавлев, А.Е. Гвоздев, А.А. Калинин, О.В. Кузовлева, Е.В. Агеев, Е.А. Гречишкин // Известия Юго-Западного государственного университета. 2017. Т. 21, № 4(73). С. 75-87.

Производство бесшовных труб осуществляется прокаткой, которая является одним из видов обработки металлов давлением, при котором металл пластически деформируется вращающимися валками.

Процесс прокатки труб при одновременном существенном изменении диаметра и толщины трубы осуществляется

на оправке [1]. Схема процесса прокатки труб на оправке приведена на рис. 1.

В очаге пластической деформации имеет место плоское напряженное (зона I) и плоское деформированное (зона II) состояния трубы. Зона плоского напряженного состояния характеризуется наличием двух участков: участок простран-

ственного изгиба до контакта с валком (Iа) и участок, контактирующий с цилиндрической поверхностью вала (Iб) [2].

Предполагается, что материал трубной заготовки несжимаем, обладает цилиндрической анизотропией механических свойств, анизотропно упрочняющийся, для которого справедливо условие текучести Мизеса-Хилла и ассоциированный закон пластического течения [3].

Сопротивление материала пластическому деформированию описывается зависимостями вида:

$$\sigma_{sij} = \sigma_{Tij} + A_{ij} (\varepsilon_e)^{n_{ij}} \left[1 + \left(\frac{\varepsilon_{ij}}{\varepsilon_e} \right)^2 \right]^{m_{ij}}, \quad (1)$$

где σ_{Tij} – пределы текучести в соответствующих направлениях; A_{ij} , n_{ij} и m_{ij} – константы материала; ε_e – интенсивность деформации; ε_{ij} – компоненты тензора деформаций.

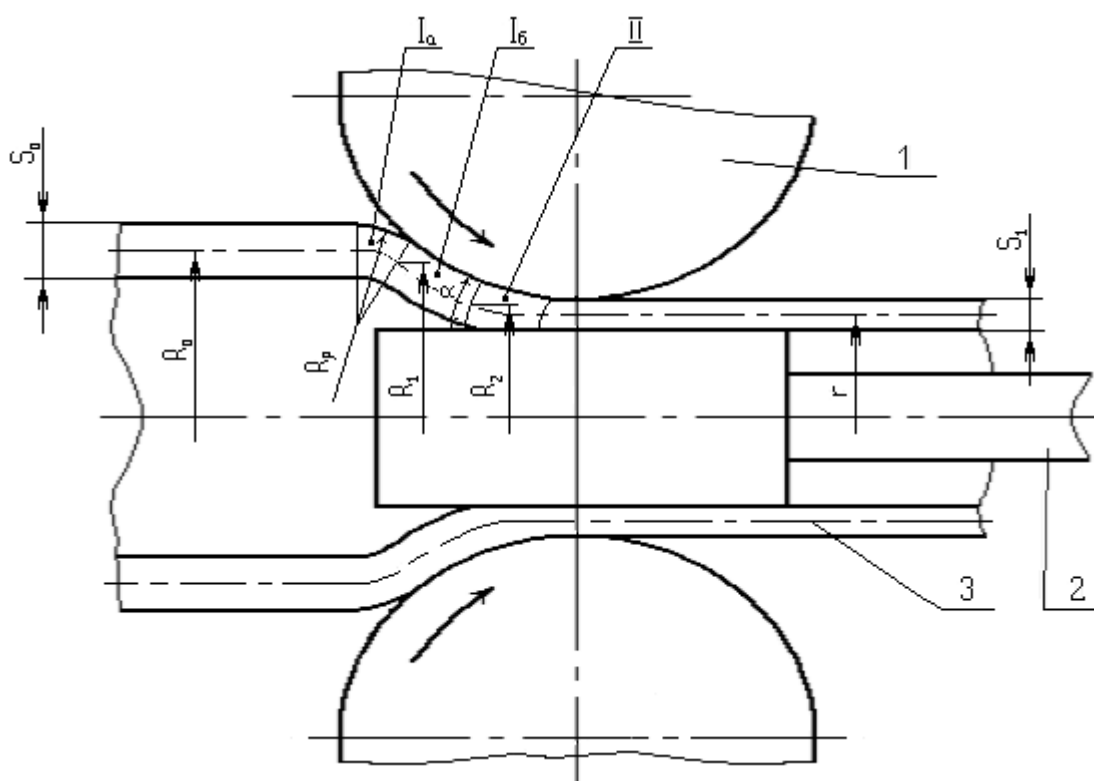


Рис. 1. Схема процесса прокатки труб на оправке

Рассмотрим распределение напряжений на участках Iа и Iб зоны I плоского напряженного состояния.

Меридиональные σ_p и окружные σ_θ напряжения на участке Iа определяются путем численного решения (методом конечных разностей) приближенного уравнения равновесия:

$$\rho \frac{d\sigma_p}{d\rho} + \sigma_p - \sigma_\theta = 0 \quad (2)$$

совместно с условием текучести (пластичности)

$$(G + H)\sigma_p^2 - 2H\sigma_p\sigma_\theta + (H + F)\sigma_\theta^2 = 1 \quad (3)$$

при граничном условии:

$$\rho = R_0; \quad \sigma_p = \sigma_{sp} \Big|_{\rho=R_0} \frac{S_0}{4R_p}, \quad (4)$$

где $\sigma_{S\rho}$ – сопротивление материала пластическому деформированию, при $\rho = R_0$. Величина радиуса свободного изгиба приближенно может быть определена по формуле

$$R_\rho = \frac{\sqrt{R_0 S_0}}{\sqrt{2 \sin \alpha}}.$$

Распределение напряжений на втором (Iб) участке очага деформации может быть найдено путем совместного численного решения уравнения равновесия (5) элемента дуговой поверхности.

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_\theta - \frac{\mu_B \sigma_\theta}{\operatorname{tg} \alpha} = 0 \quad (5)$$

и условия пластичности (3) при граничном условии:

$$\rho = R_1; \sigma_\rho = \sigma_{\rho Ia} \Big|_{\rho=R_1} + \sigma_{S\rho} \Big|_{\rho=R_1} \frac{S_0}{4R_\rho}, \quad (6)$$

где S – текущая толщина трубы при пластическом формоизменении; r – координата рассматриваемого сечения очага пластической деформации на дуговой поверхности валка; $\sigma_{S\rho} \Big|_{\rho=R_1}$ – сопротивление материала пластическому деформированию на границе между первым (Iа) и вторым (Iб) участками очага деформации при $\rho = R_1$.

Величина радиуса R_1 , соответствующего границе между первым и вторым участками очага деформации, может быть найдена по геометрическому соотношению

$$R_1 = R_0 - R_\rho (1 - \cos \alpha).$$

Для нахождения напряжений σ_ρ и σ_θ на дуговой поверхности валка (участок Iб) решаем совместно уравнение равновесия

$$\frac{d\sigma_\rho}{d\varphi} - \sigma_\rho \left(\frac{\cos \varphi}{a - \sin \varphi} + \mu_B \right) + \sigma_\theta \frac{\cos \varphi + \mu_B \sin \varphi}{a - \sin \varphi} = 0$$

и условие пластичности при граничных условиях

$$\text{при } \varphi = 0 \quad \sigma_\rho = \sigma_{\rho Ib} \Big|_{\rho=R_2} + \sigma_{S\rho} \Big|_{\rho=R_2} \frac{S_0}{4R_{BC}},$$

где φ – угол, характеризующий положение рассматриваемого сечения заготовки на дуговой поверхности валка; μ_B – коэффициент трения на контактной поверхности валка; $a = R_2 / R_{BC}$; $R_{BC} = R_B + 0,5S_0$; $\sigma_{\rho Ib}$ – величина меридионального напряжения на границе между участками Iб и Iа, вычисленная при $\varphi = 0$; $\sigma_{S\rho} \Big|_{\rho=R_2}$ – сопротивление материала пластическому деформированию с учетом его упрочнения при $\rho = R_2$.

Величина меридионального напряжения σ_ρ на выходе из очага пластической деформации определяется по соотношению

$$\sigma_\rho = \sigma_{\rho Ib} \Big|_{\varphi=\alpha} + \sigma_{S\rho} \Big|_{\varphi=\alpha} \frac{S_0}{4R_\rho},$$

а величина окружного напряжения σ_θ – из условия текучести (3).

Для учета анизотропного упрочнения материала необходимо иметь информацию о распределении деформаций в очаге пластической деформации.

Распределение окружных деформаций в зоне плоского напряженного состояния осуществляется по выражению

$$\varepsilon_\theta = \ln \frac{\rho}{R_0}. \quad (7)$$

Приращения меридиональных деформаций $d\varepsilon_\rho$ и деформаций по толщине трубы $d\varepsilon_z$ могут быть определены с учетом ассоциированного закона пластического течения

$$d\varepsilon_x = d\lambda \left[H(\sigma_x - \sigma_y) + G(\sigma_x - \sigma_y) \right];$$

$$d\gamma_{yx} = d\lambda L \tau_{yx};$$

$$\begin{aligned}d\varepsilon_y &= d\lambda \left[F(\sigma_y - \sigma_z) + H(\sigma_y - \sigma_x) \right]; \\d\gamma_{zx} &= d\lambda M \tau_{zx}; \\d\varepsilon_z &= d\lambda \left[G(\sigma_z - \sigma_x) + F(\sigma_z - \sigma_y) \right]; \\d\gamma_{xy} &= d\lambda N \tau_{xy},\end{aligned}$$

где F, G, H, L, M, N – параметры, характеризующие текущее состояние анизотропии; σ_{ij} – компоненты тензора напряжений в главных осях анизотропии; $d\varepsilon_x, d\varepsilon_y, d\varepsilon_z, d\gamma_{xy}, d\gamma_{yz}, d\gamma_{zx}$ – компоненты приращения тензора деформаций; $d\lambda$ – коэффициент пропорциональности. Здесь X, Y, Z – главные оси анизотропии.

Параметры анизотропии F, G, H, L, M, N связаны с величинами сопротивления материала пластическому деформированию следующими соотношениями.

$$\begin{aligned}2F &= \frac{1}{\sigma_{sy}^2} + \frac{1}{\sigma_{sz}^2} + \frac{1}{\sigma_{sx}^2} & 2L &= \frac{1}{\tau_{syz}^2}, \\2G &= \frac{1}{\sigma_{sz}^2} + \frac{1}{\sigma_{sx}^2} + \frac{1}{\sigma_{sy}^2} & 2M &= \frac{1}{\tau_{syz}^2}, \\2H &= \frac{1}{\sigma_{sx}^2} + \frac{1}{\sigma_{sy}^2} + \frac{1}{\sigma_{sz}^2} & 2N &= \frac{1}{\tau_{sxy}^2},\end{aligned}$$

где $\sigma_{sx}, \sigma_{sy}, \sigma_{sz}$ – величины сопротивления материала пластическому деформированию при растяжении в главных осях анизотропии; $\tau_{sxy}, \tau_{syz}, \tau_{syz}$ – величины сопротивления материала пластическому деформированию при сдвиге по отношению к главным осям анизотропии.

$$\begin{aligned}d\varepsilon_\rho &= \frac{d\rho}{\rho} \frac{H(\sigma_\rho - \sigma_\theta) + G\sigma_\rho}{F\sigma_\theta + H(\sigma_\theta - \sigma_\rho)}, \\d\varepsilon_z &= -\frac{d\rho}{\rho} \frac{G\sigma_\rho + F\sigma_\theta}{F\sigma_\theta + H(\sigma_\theta - \sigma_\rho)}.\end{aligned}$$

Величина приращения интенсивности деформации $d\varepsilon_e$ определяется по формуле

$$d\varepsilon_e = \sqrt{\frac{2}{3}} (F + G + H) \left[\begin{aligned} & F \left(\frac{Gd\varepsilon_y - Hd\varepsilon_z}{FG + GH + HF} \right)^2 + \\ & + G \left(\frac{Hd\varepsilon_z - Fd\varepsilon_x}{FG + GH + HF} \right)^2 + \\ & + H \left(\frac{Fd\varepsilon_x - Gd\varepsilon_y}{FG + GH + HF} \right)^2 + \\ & + \frac{2d\gamma_{yz}^2}{L} + \frac{2d\gamma_{zx}^2}{M} + \frac{2d\gamma_{xy}^2}{N} \end{aligned} \right]^{1/2}. \quad (8)$$

Интенсивность деформации ε_e – по выражению

$$\varepsilon_e = \int_{R_0}^{\rho} d\varepsilon_e,$$

где ρ – координата рассматриваемого сечения очага деформации.

Рассмотрим вопрос о распределении напряжений в зоне плоского деформированного состояния II зоны пластической деформации.

Схемы к теоретическому анализу второй зоны (зоны плоского деформированного состояния трубы) очага деформации при прокатке труб на оправке приведены на рис. 2.

Принимаем, что в зоне II реализуется радиальное течение материала, а на контактных границах заготовки и инструмента реализуется закон трения Кулона.

$$\tau_b = \mu_b \sigma_k \quad \text{и} \quad \tau_o = \mu_o \sigma_k,$$

где μ_b и μ_o – коэффициенты трения на контактных поверхностях вала и оправки соответственно.

Изменение направления течения материала при входе и выходе из зоны II учитывается путем коррекции радиального напряжения σ_ρ с учетом разрыва касательной составляющей на границе очага деформации по методу баланса работ.

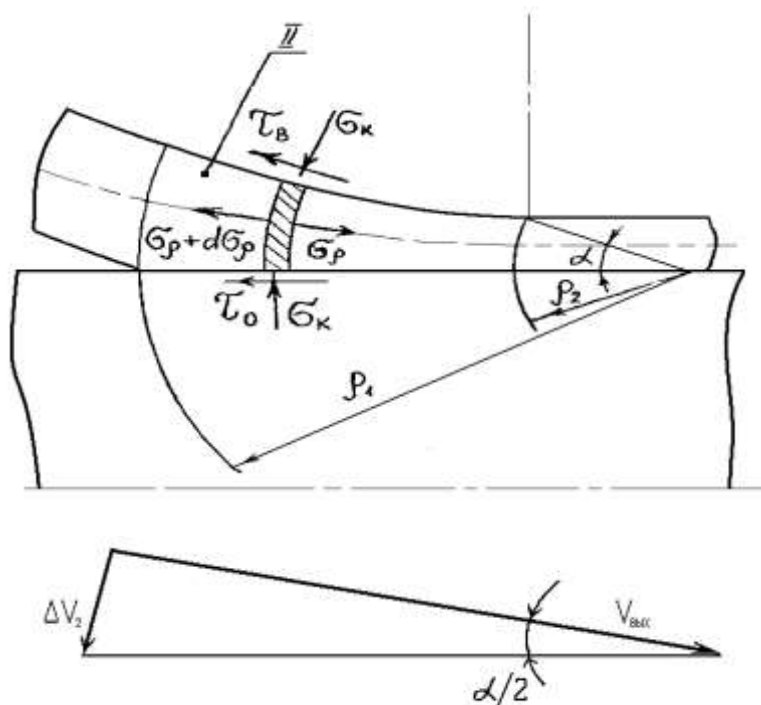


Рис. 2. Схема к теоретическому анализу второй зоны (зоны плоского деформированного состояния трубы) очага пластической деформации

Компоненты радиального σ_ρ и контактного σ_k напряжений во второй зоне очага пластической деформации определяются путем совместного решения приближенного уравнения равновесия для элемента очага пластической деформации при прокатке на оправке

$$\rho \frac{d\sigma_\rho}{d\rho} + \sigma_\rho - \sigma_k (1 + M) = 0$$

и условия текучести

$$\sigma_\rho - \sigma_k = 2\tau_{spz} \sqrt{\frac{1-c}{1-c \sin^2 2\beta}}$$

при учете граничных условий на границе зон I и II

$$\rho = \rho_1, \quad \sigma_\rho = \sigma_{\rho 1},$$

где ρ – координата рассматриваемого сечения в полярной системе координат; c – характеристика анизотропии в условиях плоской деформации, которая связана с параметрами анизотропии F, G, H, M ; $M = -(\mu_o - \mu_b) / \operatorname{tg} \alpha$; $K = (\mu_o + \mu_b) / \operatorname{tg} \alpha$;

$\tau_{\text{suз}}$ – сопротивление пластической деформации при сдвиге в плоскости ρz ; $\beta = \alpha / 2$ – угол между первым условно главным напряжением σ_ρ и осью анизотропии X .

Величина напряжения $\sigma_{\rho 1}$ находится по формуле

$$\sigma_{\rho 1} = \sigma_{\rho 1} + \Delta\sigma_{\rho b},$$

где $\sigma_{\rho 1}$ – меридиональное напряжение на границе раздела зон плоского напряженного и плоского деформированного состояний, вычисленное при $\rho = R_2$; $\Delta\sigma_{\rho b}$ – приращение радиального напряжения σ_ρ , связанное с изменением направления течения материала при входе в зону II на угол $\alpha / 2$.

Определим приращение напряжения $\Delta\sigma_{\rho b}$ по методу баланса работ.

Примем, что мощность, развиваемая приращением напряжения $\Delta\sigma_{\rho b}$, связана с

дополнительной мощностью на поворот направления течения материала при входе в зону плоского деформированного состояния.

Уравнение баланса мощностей в этом случае имеет следующий вид:

$$\Delta\sigma_{\rho B} v_B l_B = \tau_1 \Delta v_{\tau 1} l_B, \quad (9)$$

где v_B и $\Delta v_{\tau 1}$ – скорость течения материала и разрыв касательной составляющей скорости при входе в зону II соответственно; τ_1 – максимальная величина касательного напряжения, приложенного на входе в зону плоского деформированного состояния трубы; l_B – длина линии раздела между зонами I и II.

Величина разрыва составляющей скорости $\Delta v_{\tau 1}$ определяется из рассмотрения годографа скоростей на входе в зону утонения

$$\Delta v_{\tau 1} = v_B \operatorname{tg}(\alpha / 2). \quad (10)$$

Подставляя (10) в уравнение баланса мощностей (9), получим

$$\Delta\sigma_{\rho B} = \tau_1 \operatorname{tg}(\alpha / 2).$$

Максимальное касательное напряжение τ_1 определяется по формуле

$$\tau_1 = (\sigma_{\rho I} |_{\rho=\rho_1} - \sigma_{\theta I} |_{\rho=\rho_1}) / 2,$$

где $\sigma_{\rho I}$ и $\sigma_{\theta I}$ – величины меридионального и окружного напряжении на выходе из зоны плоского напряженного состояния, вычисленные при $\rho = \rho_1$.

Таким образом, имеем выражения для оценки величины напряжения $\Delta\sigma_{\rho B}$:

$$\Delta\sigma_{\rho B} = \frac{\sigma_{\rho I} - \sigma_{\theta I}}{2} \operatorname{tg}(\alpha / 2).$$

Осевое напряжение σ_x с учетом поворота течения материала на угол $\alpha / 2$ на выходе из зоны II вычисляется так:

$$\sigma_x = \sigma_{\rho II} |_{\rho=\rho_2} + \Delta\sigma_{\rho B},$$

где $\sigma_{\rho II}$ – радиальное напряжение на выходе из очага пластической деформации, вычисленное при $\rho = \rho_2$.

Выражение для определения приращения напряжения $\Delta\sigma_{\rho B}$ может быть получено аналогичным образом как и для приращения напряжения $\Delta\sigma_{\rho B}$ путем составления уравнения баланса мощностей

$$\Delta\sigma_{\rho B} v_{\text{вых}} l_{\text{вых}} = \tau_2 \Delta v_{\tau 2} l_{\text{вых}}$$

и рассмотрения годографа скоростей на выходе из очага пластической деформации для нахождения разрыва касательной составляющей скорости v_2 (рис. 2).

$$\Delta v_{\tau 2} = v_{\text{вых}} \operatorname{tg}(\alpha / 2),$$

где $v_{\text{вых}}$ и $v_{\tau 2}$ – скорость течения материала и разрыв касательной составляющей скорости при выходе из зоны плоского деформированного состояния заготовки (зоны II); τ_2 – максимальная величина касательного напряжения, приложенного на выходе из зоны II; $l_{\text{вых}}$ – длина линии раздела между зоной II и недеформированной частью трубы.

Максимальная величина касательного напряжения τ_2 вычисляется по выражению

$$\tau_2 = (\sigma_{\rho II} |_{\rho=\rho_2} - \sigma_{\kappa} |_{\rho=\rho_2}) / 2,$$

где $\sigma_{\rho II}$ и σ_{κ} – величины меридионального и контактного напряжений на выходе из зоны плоского деформированного состояния, определенные при $\rho = \rho_2$.

Приведем окончательную формулу для определения осевого напряжения на выходе из очага пластической деформации с учетом поворота течения материала по методу баланса работ:

$$\sigma_x = \sigma_{\rho II} |_{\rho=\rho_2} + \tau_{\text{спз}} \sqrt{\frac{1-c}{1-c \sin^2 \alpha}} \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2}.$$

Принимая во внимание, что в зоне II реализуется плоское деформированное состояние, т.е. приращение окружной деформации $d\varepsilon_\theta = 0$, приращения радиальных деформаций $d\varepsilon_\rho$ и деформаций по толщине трубы $d\varepsilon_z$ будут равны

$$d\varepsilon_z = -d\varepsilon_\rho = \frac{dS}{S}. \quad (11)$$

Интенсивность деформаций $d\varepsilon_e$ с учетом соотношения (11) вычисляется по выражению (8).

Изменение толщины трубы в процессе прокатки оценивается по соотношению

$$\ln \frac{S}{S_0} = - \int_{R_0}^R \frac{G\sigma_\rho + F\sigma_\theta}{F\sigma_\theta + H(\sigma_\theta - \sigma_\rho)} \frac{d\rho}{\rho}.$$

Полученные выражения для определения деформаций и напряжений позволяют осуществить анализ процесса прокатки труб на оправке с учетом анизотропии материала.

Полученные результаты могут быть использованы при создании ресурсосберегающих технологий обработки металлических материалов с использованием новых различных нанокпозиционных смазок и покрытий [4-30].

Результаты были получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России по проекту №11.6682.2017/8.9.

Список литературы

1. Технология конструкционных материалов: учебник для вузов / под ред. А.М. Дальского. М.: Машиностроение, 1977. 664 с.
2. Черняев А.В. Волочение труб из анизотропного упрочняющегося материала: дис. ... канд. техн. наук. Тула, 1998. 214 с.
3. Арышенский Ю.М., Гречников Ф.В. Теория и расчеты пластического

формоизменения анизотропных материалов. М.: Metallurgia, 1990. 304 с.

4. Гвоздев А.Е. Производство заготовок быстрорежущего инструмента в условиях сверхпластичности. М.: Машиностроение, 1992. 176 с.

5. Технология конструкционных и эксплуатационных материалов: учебник / А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков, В.И. Золотухин, Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, А.Д. Бреки; под ред. А.Е. Гвоздева. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 351 с.

6. Организация и планирование деятельности предприятий сервиса: учебное пособие / Ю.С. Дорохин, А.Н. Сергеев, К.С. Дорохина, Н.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, П.Н. Медведев, А.В. Сергеева, Д.В. Малий. Тула: Изд-во ТулГУ, 2016. 380 с.

7. Триботехнические свойства композиционных покрытий с полиимидными матрицами и наполнителями из наночастиц дихалькогенидов вольфрама для узлов трения машин: монография / А.Д. Бреки, В.В. Кудрявцев, А.Л. Диденко, Е.С. Васильева, О.В. Толочко, Н.Н. Сергеев, Н.Е. Стариков, А.Е. Гвоздев; под ред. А.Д. Бреки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. 128 с.

8. Эксплуатация, техническое обслуживание и ремонт автомобиля: учебное пособие / Н.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, А.Н. Сергеев, К.Г. Мирза, Ю.С. Дорохин, Д.М. Хонелидзе. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. 160 с.

9. Основы технологической подготовки: учеб. пособие / Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, А.Д. Бреки, Д.А. Провоторов, В.И. Золотухин, Н.Е. Стариков, П.Н. Медведев, Д.В. Малий, Ю.С. Дорохин, Д.Н. Боголюбова, А.А. Калинин, О.В. Кузовлева, К.Н. Старикова, С.Н. Кутепов, Д.М. Хонелидзе, В.В. Новикова; под ред. проф.

А.Е. Гвоздева. Изд. 2-е испр. и доп. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. 187 с.

10. Материаловедение: учебник для вузов / Ф.К. Малыгин, Н.Е. Стариков, В.М. Павлов, А.Е. Гвоздев, И.В. Тихонова. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. 232 с.

11. Триботехнические характеристики жидких смазочных и полиимидных композиционных материалов, содержащих антифрикционные наночастицы дихалькогенидов вольфрама: монография / А.Д. Бреки, Е.С. Васильева, О.В. Толочко, Н.Е. Стариков, Н.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов, А.Н. Сергеев, А.Е. Гвозде; под ред. А.Д. Бреки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2015. 276 с.

12. Многопараметрическая оптимизация параметров лазерной резки стальных листов / А.Е. Гвоздев, И.В. Голышев, И.В. Минаев, А.Н. Сергеев, Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова, Д.М. Хонелидзе, А.Г. Колмаков // Материаловедение. 2015. № 2. С. 31-36.

13. Синтез и триботехнические свойства композиционного покрытия с матрицей из полиимида (Р-ООО) ФТ и наполнителем из наночастиц дисульфида вольфрама при сухом трении скольжения / А.Д. Бреки, А.Л. Диденко, В.В. Кудрявцев, Е.С. Васильева, О.В. Толочко, А.Г. Колмаков, А.Е. Гвоздев, Д.А. Провоторов, Н.Е. Стариков, Ю.А. Фадин // Материаловедение. 2016. № 4. С. 44-48.

14. Постановка задачи расчета деформационной повреждаемости металлов и сплавов / А.Е. Гвоздев, Г.М. Журавлев, Н.Н. Сергеев, В.И. Золотухин, Д.А. Провоторов // Производство проката. 2015. №10. С. 18-26.

15. Триботехнические свойства композиционных покрытий на основе полигетероарилена «Р-ОДФО» с наполнителем из наночастиц диселенида вольфрама

/ А.Д. Бреки, Ю.А. Фадин, А.Л. Диденко, В.В. Кудрявцев, О.В. Толочко, Е.С. Васильева, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков, Д.А. Провоторов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. № 11-1. С. 133-139.

16. Триботехнические свойства композиционных покрытий на основе полигетероарилена «ДАИ» с наполнителем из наночастиц дихалькогенидов вольфрама / А.Д. Бреки, Ю.А. Фадин, А.Л. Диденко, В.В. Кудрявцев, О.В. Толочко, Е.С. Васильева, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков, Д.А. Провоторов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. № 8-2. С. 148-155.

17. Триботехнические свойства композиционных покрытий на основе полигетероарилена «Р-ОООД» с наполнителем из наночастиц диселенида вольфрама / А.Д. Бреки, Ю.А. Фадин, А.Л. Диденко, В.В. Кудрявцев, О.В. Толочко, Е.С. Васильева, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков, Д.А. Провоторов // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. № 8-2. С. 181-188.

18. Выбор дисперсности наполнителя из частиц дихалькогенидов вольфрама для создания смазочного композиционного материала / А.Д. Бреки, О.В. Толочко, Е.С. Васильева, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков, Д.А. Провоторов, А.А. Калинин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. № 7-1. С. 235-243.

19. Оценка влияния размера частиц и концентрации порошков горных пород на противоизносные свойства жидких смазочных композиций / В.В. Медведева, М.А. Скотникова, А.Д. Бреки, Н.А. Крылов, Ю.А. Фадин, А.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков // Известия Тульского государственного

университета. Технические науки. 2015. № 11-1. С. 57-65.

20. Влияние смазочного композиционного материала с наночастицами дисульфида вольфрама на трение в подшипниках качения / А.Д. Бреки, В.В. Медведева, Ю.А. Фадин, О.В. Толочко, Е.С. Васильева, А.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. № 11-1. С. 78-86.

21. Оценка взаимодействия между наночастицами диалкогогенидов вольфрама в среде жидкого смазочного материала / А.Д. Бреки, О.В. Толочко, Е.С. Васильева, А.Е. Гвоздев, Д.А. Провоторов, Н.Е. Стариков // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2015. № 7-2. С. 8-14.

22. Оценка влияния жидкого смазочного композиционного материала с наночастицами геомодификатора на трение в подшипниковом узле / А.Д. Бреки, О.В. Толочко, Н.Е. Стариков, Д.А. Провоторов, Н.Н. Сергеев, Е.В. Агеев, А.Е. Гвоздев // Известия Юго-Западного государственного университета: Серия Техника и технологии. 2015. №3(16). С.17-23.

23. Комплексный подход к исследованию экстремальных эффектов в металлических, композиционных и нанокристаллических материалах: монография / А.Е. Гвоздев, Н.Н. Сергеев, А.Н. Сергеев, Д.А. Провоторов, В.И. Золотухин, А.Д. Бреки, П.Н. Медведев, М.Н. Гаврилин, Г.М. Журавлев, Д.В. Малий, Ю.С. Дорохин, Д.Н. Боголюбова, А.А. Калинин, Д.Н. Романенко, И.В. Минаев, О.В. Кузовлева, Н.Е. Проскуряков, А.С. Пустовгар, Ю.Е. Титова, И.В. Тихонова; под ред. д-ра техн. наук, проф. А.Е. Гвоздева. Тула: Издательство ТулГУ, 2014. 128с.

24. Триботехнические свойства жидких смазочных композиционных материалов, содержащих полученные методом газофазного синтеза высокодисперсные дисульфид и диселенид вольфрама: монография / А.Д. Бреки, Е.С. Васильева, О.В. Толочко, Н.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков; под. ред. А.Д. Бреки. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. 152с.

25. Жидкие смазочные композиционные материалы, содержащие высокодисперсные наполнители, для подшипниковых узлов управляемых систем: монография / А.Д. Бреки, Е.С. Васильева, О.В. Толочко, Н.Н. Сергеев, А.Е. Гвоздев, Н.Е. Стариков. Тула: Изд-во ТулГУ, 2014. 144с.

26. Механические свойства конструкционных и инструментальных сталей в состоянии предпревращения при термомеханическом воздействии / А.Е. Гвоздев, А.Г. Колмаков, О.В. Кузовлева, Н.Н. Сергеев, И.В. Тихонова // Деформация и разрушение материалов. 2013. № 11. С. 39-43.

27. Фазовый состав частиц порошка, полученного электроэрозионным диспергированием сплава ВК8 в бутиловом спирте / Е.В. Агеева, А.Ю. Алтухов, С.С. Гулидин, Е.В. Агеев, А.А. Горохов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2016. № 1 (18). С. 20-25.

28. Размерные характеристики бронзового электроэрозионного порошка, полученного в воде / Е.В. Агеева, Е.В. Агеев, В.Ю. Чаплыгин, А.А. Горохов // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2016. № 1 (18). С. 30-35.

29. Рентгеноспектральный микроанализ нихромового порошка, полученного методом электроэрозионного дис-

пергирования в среде керосина / Е.В. Агеев, А.А. Горохов, А.Ю. Алтухов, А.В. Щербаков, С.В. Хардигов // Известия Юго-Западного государственного университета. 2016. № 1 (64). С. 26-31.

30. Агеева Е.В., Агеев Е.В., Хардигов С.В. Проведение рентгеноспектрального

микроанализа порошка шарикоподшипниковой стали // Известия Юго-Западного государственного университета. Серия: Техника и технологии. 2015. № 2 (15). С. 17-20.

Поступила в редакцию 02.06.17

UDC 621.774.3

G.M. Zhuravlev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Tula State University (Tula, Russia) (e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru)

A.E. Gvozdev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Tula State Pedagogical University named after I. N. Tolstoy (Tula, Russia) (e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru)

A.A. Kalinin, Engineer, Tula State University (Tula, Russia)

O.V. Kuzovleva, Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor, Tula State University (Tula, Russia) (e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru)

E.V. Ageev, Doctor of Engineering Sciences, Professor, Southwest State University (Kursk, Russia) (e-mail: ageev_ev@mail.ru)

E. A. Grechishkin, Postgraduate Student, Tula State University (Tula, Russia) (e-mail: gwozdew.alexandr2013@yandex.ru)

THE STUDY OF THE PROCESS OF ROLLING PIPES FROM ANISOTROPIC MATERIAL

The process of rolling pipe with simultaneous significant changes in pipe diameter and thickness is carried out at the mandrel stage. In the region of plastic deformation, biaxial stress and plane deformation state of a pipe take place. The area of biaxial stress state is characterized by the presence of two sections: a section of the spatial bending before the contact with the roll and a section which is in contact with the cylindrical surface of the roll. It is assumed that the material of a tube blank is incompressible, has a cylindrical anisotropy of mechanical properties, is anisotropically hardenable, for which the Mises-Hill yield condition and the associated law of plastic flow are valid.

The article considers stress distribution in the areas of biaxial stress state. To take into account the anisotropic hardening of the material information concerning distribution of deformations in the region of plastic deformation was taken into account. The problem of stress distribution in the region of plane deformation state of the region of plastic deformation was considered. It is assumed that radial flow of the material occurs in the region and Coulomb's law of friction is realized at the contact boundaries of the workpiece and the tool. The change in the direction of material flow at the inlet and outlet of the region is taken into account by means of radial stress modification with regard to the discontinuity of the tangential component at the boundary of the deformation region by the work balance method. The expressions obtained for determining deformations and stresses makes it possible to analyze the process of rolling pipes at the mandrel stage taking into account material anisotropy. The obtained results can be used to create resource-saving technologies for processing metallic materials using new nanocomposite lubricants and coatings.

Key words: seamless steel pipe production by means of rolling, cylindrical anisotropy of mechanical properties of the material, stress-deformation state.

DOI: 10.21869/2223-1560-2017-21-4-75-87

For citation: Zhuravlev G.M., Gvozdev A.E., Kalinin A.A., Kuzovleva O.V., Ageev E.V., Grechishkin E. A., The Study of the Process of Rolling Pipes from Anisotropic Material/ Proceeding of Southwest State University, 2017, vol. 21, no. 3(72), pp. 75-87 (in Russ.).

Reference

1. Tehnologija konstrukcionnyh materialov: uchebnik dlja vuzov / pod red. A.M. Dal'skogo. M.: Mashinostroenie, 1977, 664 p.
2. Chernjaev A.V. Volochenie trub iz anizotropnogo uprochnjajushhegosja materiala: dis. ... kand. tehn. nauk. Tula, 1998, 214 p.
3. Aryshenskij Ju.M., Grechnikov F.V. Teorija i raschety plasticheskogo formoizmenenija anizotropnyh materialov. M.: Metallurgija, 1990, 304 p.
4. Gvozdev A.E. Proizvodstvo zagotovok bystrorezhushhego instrumenta v uslovijah sverhplastichnosti. M.: Mashinostroenie, 1992, 176 p.
5. Tehnologija konstrukcionnyh i jekspluacionnyh materialov: uchebnik / A.E. Gvozdev, N.E. Starikov, V.I. Zolotuhin, N.N. Sergeev, A.N. Sergeev, A.D. Breki; pod red. A.E. Gvozdeva. Tula: Izd-vo TulGU, 2016, 351 p.
6. Organizacija i planirovanie dejatel'nosti predpriyatij servisa: uchebnoe posobie / Ju.S. Dorohin, A.N. Sergeev, K.S. Dorohina, N.N. Sergeev, A.E. Gvozdev, P.N. Medvedev, A.V. Sergeeva, D.V. Malij. Tula: Izd-vo TulGU, 2016, 380 p.
7. Tribotekhnicheskie svojstva kompozicionnyh pokrytij s poliimidnymi matricami i napolniteljami iz nanochastic dihal'kogenidov vol'frama dlja uzlov trenija mashin: monografija / A.D. Breki, V.V. Kudrjavcev, A.L. Didenko, E.S. Vasil'eva, O.V. Tolochko, N.N. Sergeev, N.E. Starikov, A.E. Gvozdev; pod red. A.D. Breki. Tula: Izd-vo TulGU, 2015, 128 p.
8. Jekspluacija, tekhnicheskoe obsluzhivanie i remont avtomobilja: uchebnoe posobie / N.N. Sergeev, A.E. Gvozdev, A.N. Sergeev, K.G. Mirza, Ju.S. Dorohin, D.M. Honelidze. Tula: Izd-vo TulGU, 2015, 160 p.
9. Osnovy tekhnologicheskij podgotovki: ucheb. posobie / N.N. Sergeev, A.N. Sergeev, A.E. Gvozdev, A.G. Kolmakov, A.D. Breki, D.A. Provotorov, V.I. Zolotuhin, N.E. Starikov, P.N. Medvedev, D.V. Malij, Ju.S. Dorohin, D.N. Bogoljubova, A.A. Kalinin, O.V. Kuzovleva, K.N. Starikova, S.N. Kutepov, D.M. Honelidze, V.V. Novikova; pod red. prof. A.E. Gvozdeva. Izd. 2-e ispr. i dop. Tula: Izd-vo TulGU, 2015, 187 p.
10. Materialovedenie: uchebnik dlja vuzov / F.K. Malygin, N.E. Starikov, V.M. Pavlov, A.E. Gvozdev, I.V. Tihonova. Tula: Izd-vo TulGU, 2014, 232 p.
11. Tribotekhnicheskie karakteristiki zhidkih smazochnyh i poliimidnyh kompozicionnyh materialov, sodержashhih anti-frikcionnye nanochasticy dihal'kogenidov vol'frama: monografija / A.D. Breki, E.S. Vasil'eva, O.V. Tolochko, N.E. Starikov, N.N. Sergeev, D.A. Provotorov, A.N. Sergeev, A.E. Gvozdev; pod red. A.D. Breki. Tula: Izd-vo TulGU, 2015, 276 p.
12. Mnogoparametricheskaja optimizacija parametrov lazernoj rezki stal'nyh listov / A.E. Gvozdev, I.V. Golyshchev, I.V. Minaev, A.N. Sergeev, N.N. Sergeev, I.V. Tihonova, D.M. Honelidze, A.G. Kolmakov. Materialovedenie, 2015, no. 2, pp. 31-36.
13. Sintez i tribotekhnicheskie svojstva kompozicionnogo pokrytija s matricoj iz poliimida (R-OOO) FT i napolnitelem iz nanochastic disul'fida vol'frama pri suhom trenii skol'zhenija / A.D. Breki, A.L. Didenko, V.V. Kudrjavcev, E.S. Vasil'eva, O.V. Tolochko, A.G. Kolmakov, A.E. Gvozdev, D.A. Provotorov, N.E. Starikov, Ju.A. Fadin. Materialovedenie, 2016, no. 4, pp. 44-48.

14. Postanovka zadachi rascheta de-
formacionnoj povrezhdaemosti metallov i
splavov / A.E. Gvozdev, G.M. Zhuravlev,
N.N. Sergeev, V.I. Zolotuhin, D.A. Pro-
votorov. *Proizvodstvo prokata*, 2015, no.10,
pp. 18-26.

15. Tribotekhnicheskie svojstva kompo-
zicionnyh pokrytij na osnove polige-
teroarilena «R-ODFO» s napolnitelem iz
nanochastic diselenida vol'frama / A.D. Bre-
ki, Ju.A. Fadin, A.L. Didenko, V.V. Kudr-
javcev, O.V. Tolochko, E.S. Vasil'eva, A.E.
Gvozdev, N.E. Starikov, D.A. Provotorov.
*Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo uni-
versiteta. Tehniceskie nauki*, 2015, no. 11-1,
pp. 133-139.

16. Tribotekhnicheskie svojstva kom-
pozicionnyh pokrytij na osnove
poligeteroarilena «DAI» s napolnitelem iz
nanochastic dihal'kogenidov vol'frama /
A.D. Breki, Ju.A. Fadin, A.L. Didenko, V.V.
Kudrjavcev, O.V. Tolochko, E.S. Vasil'eva,
A.E. Gvozdev, N.E. Starikov, D.A. Provoto-
rov. *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo
universiteta. Tehniceskie nauki*, 2015, no.
8-2, pp. 148-155.

17. Tribotekhnicheskie svojstva kom-
pozicionnyh pokrytij na osnove polige-
teroarilena «R-OOOD» s napolnitelem iz
nanochastic diselenida vol'frama / A.D. Bre-
ki, Ju.A. Fadin, A.L. Didenko, V.V. Kudr-
javcev, O.V. Tolochko, E.S. Vasil'eva, A.E.
Gvozdev, N.E. Starikov, D.A. Provotorov.
*Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo uni-
versiteta. Tehniceskie nauki*, 2015, no. 8-2,
pp. 181-188.

18. Vybor dispersnosti napolnitelja iz
chastic dihal'kogenidov vol'frama dlja soz-
danija smazochnogo kompozicionnogo ma-
teriala / A.D. Breki, O.V. Tolochko, E.S.
Vasil'eva, A.E. Gvozdev, N.E. Starikov,

D.A. Provotorov, A.A. Kalinin. *Izvestija
Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta.
Tehniceskie nauki*, 2015, no. 7-1, pp. 235-243.

19. Ocenka vlijanija razmera chastic i
koncentracii poroshkov gornyh porod na
protivoiznosnye svojstva zhidkih smazo-
chnyh kompozicij / V.V. Medvedeva, M.A.
Skotnikova, A.D. Breki, N.A. Krylov, Ju.A.
Fadin, A.N. Sergeev, D.A. Provotorov, A.E.
Gvozdev, N.E. Starikov. *Izvestija Tul'skogo
gosudarstvennogo universiteta. Tehniceskie
nauki*, 2015, no. 11-1, pp. 57-65.

20. Vlijanie smazochnogo kompozici-
onnogo materiala s nanochasticami disul'fida
vol'frama na trenie v podshipnikah kachenija
/ A.D. Breki, V.V. Medvedeva, Ju.A. Fadin,
O.V. Tolochko, E.S. Vasil'eva, A.N. Ser-
geev, D.A. Provotorov, A.E. Gvozdev, N.E.
Starikov. *Izvestija Tul'skogo gosudarstven-
nogo universiteta. Tehniceskie nauki*, 2015,
no. 11-1, pp. 78-86.

21. Ocenka vzaimodejstvija mezhdru
nanochasticami dihal'kogenidov vol'frama v
srede zhidkogo smazochnogo materiala /
A.D. Breki, O.V. Tolochko, E.S. Vasil'eva,
A.E. Gvozdev, D.A. Provotorov, N.E. Sta-
rikov. *Izvestija Tul'skogo gosudarstvennogo
universiteta. Tehniceskie nauki*, 2015,
no. 7-2, pp. 8-14.

22. Ocenka vlijanija zhidkogo smazoch-
nogo kompozicionnogo materiala s nano-
chasticami geomodifikatora na trenie v pod-
shipnikovom uzle / A.D. Breki, O.V. To-
lochko, N.E. Starikov, D.A. Provotorov,
N.N. Sergeev, E.V. Ageev, A.E. Gvozdev.
*Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvenno-
go universiteta: Serija Tehnika i tehnologii*,
2015, no. 3(16), pp.17-23.

23. Kompleksnyj podhod k issledo-
vaniju jekstremal'nyh jeffektov v metal-
licheskih, kompozicionnyh i nanokristallich-

eskikh materialah: monografija / A.E. Gvozdev, N.N. Sergeev, A.N. Sergeev, D.A. Provotorov, V.I. Zolotuhin, A.D. Breki, P.N. Medvedev, M.N. Gavrilin, G.M. Zhuravlev, D.V. Malij, Ju.S. Dorohin, D.N. Bogoljubova, A.A. Kalinin, D.N. Romanenko, I.V. Minaev, O.V. Kuzovleva, N.E. Proskurjakov, A.S. Pustovgar, Ju.E. Titova, I.V. Tihonova; pod red. d-ra tehn. nauk, prof. A.E. Gvozdeva. Tula: Izdatel'stvo TulGU, 2014, 128 p.

24. Tribotekhnicheskie svojstva zhidkih smazochnyh kompozicionnyh materialov, sodержashhih poluchennye metodom gazofaznogo sinteza vysokodispersnye disulfid i diselenid vol'frama: monografija / A.D. Breki, E.S. Vasil'eva, O.V. Tolochko, N.N. Sergeev, A.E. Gvozdev, N.E. Starikov; pod red. A.D. Breki. Tula: Izd-vo TulGU, 2014, 152 p.

25. Zhidkie smazochnye kompozicionnye materialy, sodержashhie vysokodispersnye napolniteli, dlja podshipnikovyh uzlov upravljajemyh sistem: monografija / A.D. Breki, E.S. Vasil'eva, O.V. Tolochko, N.N. Sergeev, A.E. Gvozdev, N.E. Starikov. Tula: Izd-vo TulGU, 2014, 144 ps.

26. Mehanicheskie svojstva konstrukcionnyh i instrumental'nyh stalej v sostojanii predprevrashhenija pri termomehanicheskom vozdejstvii / A.E. Gvozdev, A.G. Kolmakov, O.V. Kuzovleva, N.N. Ser-

geev, I.V. Tihonova. Deformacija i razrushenie materialov, 2013, no. 11, pp. 39-43.

27. Fazovyy sostav chastic poroshka, poluchennogo jelektrojerozionnym dispergirovanijem splava VK8 v butilovom spirte / E.V. Ageeva, A.Ju. Altuhov, S.S. Gulidin, E.V. Ageev, A.A. Gorohov. Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Tehnika i tehnologii, 2016, no. 1 (18), pp. 20-25.

28. Razmernye karakteristiki bronzo-vogo jelektrojerozionnogo poroshka, poluchennogo v vode / E.V. Ageeva, E.V. Ageev, V.Ju. Chaplygin, A.A. Gorohov. Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Tehnika i tehnologii, 2016, no. 1 (18), p. 30-35.

29. Rentgenospektral'nyj mikroanaliz nihromovogo poroshka, poluchennogo metodom jelektrojerozionnogo dispergirovanija v srede kerosina / E.V. Ageev, A.A. Gorohov, A.Ju. Altuhov, A.V. Shherbakov, S.V. Hardikov. Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta, 2016, no. 1 (64), pp. 26-31.

30. Ageeva E.V., Ageev E.V., Hardikov S.V. Provedenie rentgenospektral'nogo mikroanaliza poroshka sharikopodshipnikovoj stali. Izvestija Jugo-Zapadnogo gosudarstvennogo universiteta. Serija: Tehnika i tehnologii, 2015, no. 2 (15). pp. 17-20.