

Обработка металлов давлением. Технологии и машины обработки давлением

УДК 621.7.075

DOI: 10.14529/met190108

ОПРЕДЕЛЕНИЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО ПОЛЯ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ СТАЛЬНОЙ ПРОВОЛОКИ С ЦЕЛЬЮ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАБОТОСПОСОБНОСТИ И ПОВЫШЕНИЯ ДОЛГОВЕЧНОСТИ УЗЛА РОЛИКОВОЙ ВОЛОКИ

А.А. Авраменко^{1, 2}, С.С. Стругов^{3, 4}

¹ Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск, Россия,

² Университет Жана Монне, г. Сент-Этьен, Франция,

³ Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск, Россия,

⁴ Национальная инженерная школа Сент-Этьена, г. Сент-Этьен, Франция

Рассмотрено распределение температурного поля в узле ролика волокна при волочении низкоуглеродистой стали с целью определения работоспособности и повышения долговечности работы узла методом осевого охлаждения вала. Составлена первичная модель для определения количества отведенного тепла, основанная на уравнении плотности теплового потока, определения оптимальных параметров расхода охлаждающей жидкости и оптимального сечения охлаждающего канала в зависимости от применяемого типоразмера проволоки. По результатам расчетов базовой модели можно сделать выводы о неработоспособности системы в связи с высокими температурными напряжениями и деформациями на контакте ролика и внешнего кольца подшипника. Однако в дальнейшем планируется составить более детализированную модель с учетом энергосиловых параметров, рассеивания теплоты в воздухе, а также уноса теплоты проволокой. Представлен план реализации проекта, заключающийся в теоретическом описании процесса распределения тепла, компьютерном моделировании и проведении натурального эксперимента. Компьютерное моделирование планируется провести на базе программных комплексов DEFORM-3D и CFdesign. Приведенные программы отличаются высокой точностью результатов, значения которых коррелируются с экспериментальными данными. Также программа CFdesign позволяет реализовать процессы передачи между жидкостью и цилиндрической стенкой. Однако для подтверждения математической и компьютерной модели необходимо проведение натурального эксперимента на базе лабораторий «ОМД» МГТУ им. Носова и лаборатории «Инновационные методы ОМД» ЮУрГУ (НИУ). Эксперимент будет проводиться на роликовой волоке ВР-180, что обусловлено достаточно удобной конструкцией и экономической обоснованностью проведения испытаний.

Ключевые слова: волочение, роликовая волока, распределение температуры, охлаждение.

Введение

В рамках расширения производства сортового проката и метизов Российской Федерации наблюдается тенденция к росту требований заказчиков касательно качества и стоимости продукции, в частности к стальной проволоке. Значительную часть в этом сегменте занимает холоднотянутая проволока из нелегированной стали – 86,59 %, доля холоднотянутой проволоки из нержавеющей стали составляет лишь 0,58 % и доля холоднотянутой проволоки из прочих легированных ста-

лей составляет 12,83 % [1, 2]. С учетом сложившейся ситуации необходимо обеспечить высокую производительность и качество проволоки на действующих предприятиях, не увеличивая ее себестоимость.

Различают волочение в монолитных фильерах и роликовых волоках. Несмотря на то, что роликовые волокна имеют достаточно специфическую конструкцию и требуют более квалифицированный персонал для их обслуживания, они имеют ряд преимуществ над монолитным волочением: снижение усилия деформации,

уменьшение энергетических затрат в среднем на 20–40 %, сокращение подготовительных операций, исключение применения специализированных дорогостоящих смазок [3–5].

Однако растущие объемы производства требуют повышенных скоростей волочения проволоки, что негативно сказывается на подшипниковых узлах роликов и необходимости применения смазочно-охлаждающих жидкостей (далее – СОЖ). При волочении температура разогрева проволоки может достигать температуры рекристаллизации и тем самым нагреть волок и подшипник, что приведет к поломке последнего. Оптимальная температура работы подшипника находится в диапазоне 20–70 °С. Существуют подшипники, способные работать при температуре до 150 °С, фирмы SKF, однако они являются тихходными и дорогостоящими для серийного применения [6].

На данный момент самым распространенным методом охлаждения рабочих валков является непосредственное нанесение СОЖ на валки волок при помощи насоса. Данный метод является максимально простым и дешевым в применении: не требует затрат на оборудование, отсутствует необходимость в обучении персонала. Тем не менее имеется ряд недостатков, связанных в первую очередь с вымыванием смазки из подшипников, что значительно уменьшает их срок службы, а также с культурой производства, так как СОЖ попадает на проволоку, проходящую через волок, в результате чего приводит к загрязнению волочильного стана.

В связи со специфичной конструкцией роликовых волок размещение систем охлаждения роликов, как в прокатных клетях, невозможно. Для решения этих проблем предложен метод охлаждения подшипника через ось валка. Это позволяет избежать вымывания смазки, исключить попадание СОЖ на проволоку, а также не подразумевает покупку дополнительного оборудования. Однако этот метод применяется в волокнах при изготовлении легкодеформируемых металлах и сплавах, тем не менее применение его на холодном волочении легированных и углеродистых сталях весьма спорно.

В настоящей статье предлагается определить проблемное поле задачи, предложить математические модели распределения температуры, а также представить предстоящий план работ в рамках реализации проекта.

Методы

В рамках реализации разработки математической модели распределения температурного поля предлагается составить тепловой баланс. Схема расчета теплового баланса представлена на рис. 1, где 1 – ролик, 2 – подшипник, 3 – ось, 4 – охлаждающий канал.

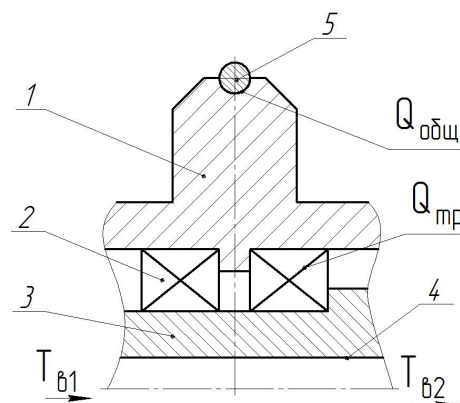


Рис. 1. Схема расчета теплового баланса

В качестве примера для расчета возьмем роликовую волоку ВР-180. Проводим волочение стальной проволоки $\varnothing 6,5$ в $\varnothing 5,5$. Материал проволоки – сталь 09Г2С. Примем разогрев поверхности волок 300 °С, температуру канала без охлаждающей жидкости на начальном этапе – 20 °С.

Обозначения, представленные на рис. 1:

$$Q_{общ} = Q_d + Q_{тр1}, \quad (1)$$

Q_d – количество теплоты, выделяемое в процессе деформации;

$Q_{тр1}$ – количество теплоты, выделяемое при трении в очаге деформации;

$Q_{тр}$ – количество теплоты, выделяемое при трении в подшипниковой паре;

$T_{в1}$ – температура СОЖ на входе в ось;

$T_{в2}$ – температура СОЖ на выходе из

оси.

Для расчета работоспособности подшипниковой пары воспользуемся уравнением плотности теплового потока (2). Данный метод используем для грубой оценки распределения температурного поля, тем самым реализуя базис для дальнейшего уточнения рассеивания температур в подшипниковой паре.

$$q = \frac{Q}{F \cdot \tau}, \quad (2)$$

где q – плотность теплового потока;

F – площадь поверхности теплопередачи;

τ – время.

Так как мы рассматриваем стационарную теплопередачу, то время процесса не учитывается. Схема расчета температур контактных поверхностей приведена на рис. 2.

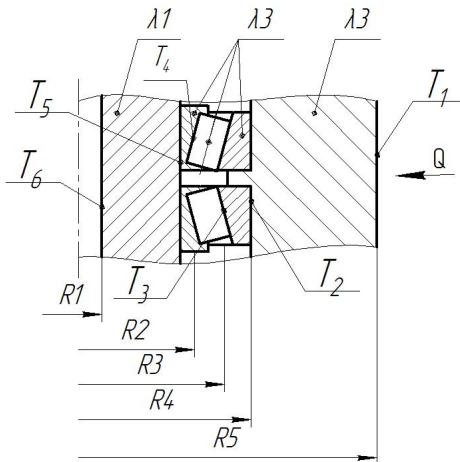


Рис. 2. Схема расчета температур контактных поверхностей

Для определения температур стенок воспользуемся формулой определения плотности теплового потока:

$$q = \frac{T_1 - T_6}{\frac{\delta_1}{\lambda_1} + \frac{\delta_2}{\lambda_2} + \frac{\delta_3}{\lambda_2} + \frac{\delta_4}{\lambda_2} + \frac{\delta_5}{\lambda_3}} \quad (3)$$

где δ_i – толщина стенок тел участвующих в теплообмене;

λ_1 – коэффициент теплопроводности.

Расчет температуры стенки канала с водой:

$$T_6 = t_b + \frac{q}{a_1} \quad (4)$$

где t_b – средняя установившаяся температура СОЖ в процессе теплоотдачи;

a_1 – коэффициент теплоотдачи.

Расчет коэффициента теплоотдачи для различного вида потока жидкости в охлаждающем канале будет приведен в следующей статье совместно с расчетом энергосиловых параметров процесса. В настоящей статье приведена лишь базовая система и проблемная область.

Формула расчета погонной плотности теплового потока:

$$q_l = \frac{2 \cdot \pi \cdot (T_1 - T_6)}{\frac{1}{\lambda_1} \ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right) + \frac{1}{\lambda_2} \ln\left(\frac{R_2}{R_5}\right) + \frac{1}{\lambda_3} \ln\left(\frac{R_5}{R_6}\right)} \quad (5)$$

Расчет температур стенок роликовой проволоки:

$$T_2 = T_1 - \frac{q_l}{2 \cdot \pi} \cdot \left(\frac{1}{\lambda_1} \cdot \ln\left(\frac{R_1}{R_2}\right) \right) \quad (6)$$

Результаты

В ходе проведения расчетов были получены следующие результаты: определены плотность теплового потока (3), температура стенки охлаждающего канала (4), погонная плотность теплового потока процесса по уравнению (5) и температуры на контактных поверхностях.

Плотность теплового потока процесса:

$$q = \frac{300 - 20}{\frac{39,5 \cdot 10^{-3}}{40} + \frac{5 \cdot 10^{-3} + 10 \cdot 10^{-3} + 7,5 \cdot 10^{-3}}{37} + \frac{18,5 \cdot 10^{-3}}{43}} = 1,37 \cdot 10^5 \frac{\text{Дж}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$$

Расчет температуры стенки канала с водой:

$$T_6 = 20 + \frac{1,37 \cdot 10^5}{4997,4} = 47,41 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Расчет погонной плотности теплового потока:

$$q_l = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot (300 - 47,41)}{\frac{1}{40} \ln\left(\frac{89,5}{50}\right) + \frac{1}{37} \ln\left(\frac{50}{27,5}\right) + \frac{1}{43} \ln\left(\frac{27,5}{9}\right)} = 27,98 \frac{\text{кДж}}{\text{м}^2 \cdot \text{с}}$$

По полученным значениям погонной плотности теплового потока без учета потери теплоты в атмосфере можем рассчитать температуры поверхностей контакта и составить эпюру температур.

Расчет температур стенок роликовой проволоки. Рассчитаем температуру на контакте ролика и внешнего кольца подшипника:

$$T_2 = 300 - \frac{27,98 \cdot 10^3}{6,28} \cdot 0,015 = 235,2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

По аналогичной схеме посчитаем температуру на контакте внешнего кольца с роликами подшипника:

$$T_3 = 235,2 - \frac{27,98 \cdot 10^3}{6,28} \cdot 0,0028 = 222,5 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Далее определим температуру на контактной поверхности внутреннего кольца и роликами подшипника без учета потерь теплового потока:

$$T_4 = 222,5 - \frac{27,98 \cdot 10^3}{6,28} \cdot 0,0068 = 192,2 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

На заключительном этапе вычислим температуру на контакте внутреннего гольца и оси роликовой проволоки:

$$T_5 = 192,2 - \frac{27,98 \cdot 10^3}{6,28} \cdot 0,015 = 163,1 \text{ } ^\circ\text{C}.$$

Эпюра распределения температурного поля представлена на рис. 3.

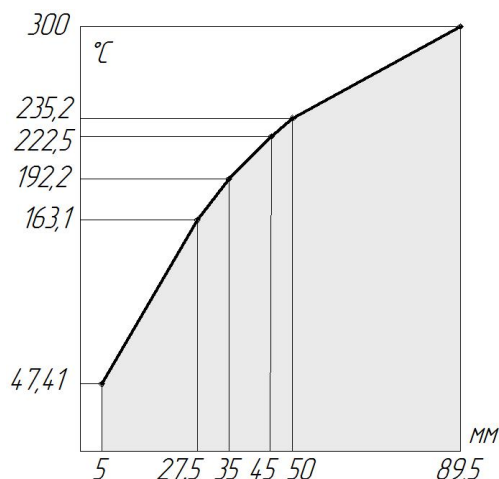


Рис. 3. Эюра распределения температурного поля в узле роликовой волоки

Обсуждение

По результатам, полученным в ходе выполнения данной работы, можно сделать выводы о неработоспособности узла роликовой волоки при осуществлении процесса без охлаждающей жидкости. Это объясняется высокой температурой на контакте вала и подшипника. Наилучшая работоспособность и долговечность подшипниковой пары обеспечивается при работе до 70–80 °C. Безусловно, данная модель достаточно условная и показывает лишь распределение температурного поля, исходя из граничных условий задачи, и не учитывает потери тепла в воздухе, количество теплоты, уносимое проволокой. Также значение разогрева тела вала до 300 °C условно и учитывает максимальный стационарный разогрев механизма при сухом трении с достаточно низкими потерями теплоты в окружающей среде. Однако это позволяет реализовать простейшую математическую модель распределения температур и в дальнейшем внести уточнения. Прежде всего, по мнению авторов, необходимо провести расчет энергосиловых параметров процесса волочения по приведенному примеру и определить мощность деформации для более точной оценки температур в очаге деформации. Также требуется определить выделение теплоты в подшипниковой паре, образующееся за счет трения. Одним из наиболее сложных и актуальных вопросов данной работы является определение возможности охлаждения внешнего кольца подшипника через тела качения (сепаратор подшипника). В рамках работы предлагается план реализации проекта:

1. Разработка модели распределения температурного поля с учетом охлаждения через осевой канал. Данную модель предлагается осуществить с расчетом коэффициента теплоотдачи по критерию Нуссельта. Также рассчитать мощность деформации и усилие процесса [7–10].

2. Проведение моделирования на базе программного пакета DEFORM-3D и CFdesign в лаборатории суперкомпьютерного моделирования ЮУрГУ. Использование двух программных комплексов обусловлено необходимостью расчета процессов деформации материала и распределения температурного поля в теле валкового узла, а также расчета теплообмена жидкости в охлаждающем канале с целью определения конечных температур [11].

3. Проведение натурного эксперимента на базе лаборатории «Инновационных методов ОМД» ЮУрГУ (НИУ) и лаборатории «ОМД» МГТУ им. Носова. Проведение эксперимента планируется на роликовой волоке ВР-180. По полученным результатам проведенных исследований сравнить данные компьютерного моделирования и теоретических расчетов и сделать выводы о работоспособности представленной системы охлаждения [12–15].

Выводы

В ходе работы по определению работоспособности подшипникового узла роликовой волоки реализована базовая модель распределения температурного поля. Посчитаны температуры контактных поверхностей. В ходе работы сделаны выводы о неработоспособности подшипниковой пары без подвода охлаждающей жидкости. Также определены основные причины потери теплоты, которые в дальнейшем будет необходимо использовать в расчетах, такие как рассеивание теплоты в атмосфере, унос проволокой, а также потери на сепараторе подшипника. Представлена эюра распределения температурного поля.

Приведен план реализации проекта, включающий в себя составление математической модели, проведение компьютерного моделирования и натурного эксперимента.

Литература

1. Яценко, В.А. Рынок проволоки России: анализ текущей ситуации, краткосрочные прогнозы / В.А. Яценко // XII ежегодная конференция «Рынки сортового проката», Батуми, 13–14 октября, 2016. – Батуми, 2016. – С. 35–40.

2. *Технология конструкционных материалов: учеб. пособие для вузов / А. М. Дальский, В.С. Гаврилюк, Л.Н. Бухаркин и др. – М.: Машиностроение, 1990. – 352 с.*
3. *Колмогоров, Г.Л. Температурные режимы и критические скорости при волочении проволоки / Г.Л. Колмогоров, Н.А. Кошелева // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 2016. – № 3. – С. 34–39.*
4. *Сметнёва, Н.Ю. Динамика развития температурного поля приповерхностного слоя проволоки при волочении / Н.Ю. Сметнёва, А.Б. Иванцов, С.Г. Шишкова // Черная металлургия. – 2017. – № 7. – С. 104–108.*
5. *Анурьев, В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3 т. / В.И. Анурьев. – 5-е изд., перераб. и доп. – М.: Машиностроение, 1979. – Т. 2. – 559 с.*
6. *ГОСТ 27365–87. Подшипники роликовые конические однорядные повышенной грузоподъемности. Основные размеры. – Введ. 01.07.88. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1988. – 47 с.*
7. *Колмогоров, В.Л. Механика обработки металлов давлением / В.Л. Колмогоров. – Изд-во УГТУ – УПИ, 2001. – 835 с.*
8. *Воронцов, А.Л. Технологические задачи теории пластичности / А.Л. Воронцов. – М.: Машиностроение-1, 2006. – Т. 3. – 475 с.*
9. *Сторожев, М.В. Теория обработки металлов давлением / М.В. Сторожев, Е.А. Попов. – М.: Машиностроение, 1977. – 424 с.*
10. *Гун, Г.Я. Теоретические основы обработки металлов давлением / Г.Я. Гун. – М.: Металлургия, 1980. – 456 с.*
11. *Стругов, С.С. Сравнение методов оценки напряженно-деформируемого состояния при осадке цилиндрической заготовки / С.С. Стругов, В.А. Иванов, В.Г. Шеркунов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2016. – Т. 16, № 4. – С. 140–146. DOI: 10.14529/met160416*
12. *Дёмин, Д.О. Моделирование процессов волочения проволок / Д.О. Дёмин, Г.А. Дядиченко // Авиакосмические технологии (АКТ-2016): тр. XVII Междунар. науч.-техн. конф. и школы молодых ученых, аспирантов и студентов. – 2016. – С. 10–11.*
13. *Сметнёва, Н.Ю. Соответствие эксперименту результатов моделирования в среде DEFORM процесса разогрева проволоки при волочении / Н.Ю. Сметнёва, А.Б. Иванцов, С.Г. Шишкова // Научная дискуссия: вопросы технических наук. – 2016. – № 3. – С. 57–62.*
14. *Головизин, Г.Н. Оценка усилий локализации деформации при волочении проволоки / Г.Н. Головизин // Сталь. – 2014. – № 4. – С. 66–67.*
15. *Битков В.В. Эффективность применения сборных волок для волочения проволоки / В.В. Битков // Технология металлов. – 2015. – № 9. – С. 14–20.*

Авраменко Алексей Андреевич, бакалавр, кафедра обработки металлов давлением, Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова, г. Магнитогорск; Университет Жана Монне, г. Сент-Этьен, Франция; avramenko_aleksei@mail.ru.

Стругов Сергей Сергеевич, магистрант, кафедра процессов и машин обработки металлов давлением, Южно-Уральский государственный университет, г. Челябинск; Национальная инженерная школа Сент-Этьена, г. Сент-Этьен, Франция; Strugov_s174@mail.ru.

Поступила в редакцию 13 ноября 2018 г.

DETERMINATION OF THE DISTRIBUTION OF A TEMPERATURE FIELD IN THE INVOLVEMENT OF A STEEL WIRE IN ORDER TO ENSURE THE WORKING CAPACITY AND IMPROVE THE DURABILITY OF THE ROLLER DIE

A.A. Avramenko^{1,2}, avramenko_aleksei@mail.ru,
S.S. Strugov^{3,4}, Strugov_s174@mail.ru

¹ Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Russian Federation,

² Jean-Monnet University, Saint-Etienne, France,

³ South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation,

⁴ National Engineering School of Saint-Etienne, Saint-Etienne, France

This article discusses the temperature field distribution in the roller unit of the die when drawing low carbon steel to determine the efficiency and increase the durability of the node by the method of axial cooling of the roll. A primary model was compiled to determine the amount of heat removed based on the equation of heat flux density, determining the optimal flow parameters of the cooling liquid and the optimal cross-section of the cooling channel depending on the wire size used. According to the results of calculations of the base model, it is possible to draw conclusions about the inoperability of the system due to high temperature stresses and deformations at the contact of the roller and the outer ring of the bearing. However, in the future it is planned to make a more detailed model taking into account the energy-power parameters, the dispersion of heat in the air, as well as the loss of heat by the wire. A project implementation plan is presented, which consists in a theoretical description of the heat distribution process, computer simulation, and a full-scale experiment. Computer modeling is planned to be carried out on the basis of DEFORM 3D and CFdesign software systems. The given programs are distinguished by high accuracy of the results, the values of which are correlated with experimental data. The same program CFdesign allows you to implement the transfer process between the liquid and the cylindrical wall.

However, to confirm the mathematical and computer model, it is necessary to conduct a full-scale experiment on the basis of laboratories "Metal Forming" of Nosov Magnitogorsk State Technical University and laboratories "Innovative methods of metal forming" of South Ural State University (NRU). The experiment will be carried out on a roller dredge BP-180, which is due to a rather convenient design and economic feasibility of testing.

Keywords: dragging, roller die, temperature distribution, cooling.

References

1. Yatsenko V.A. [Russian Wire Market: Analysis of the Current Situation, Short-Term Forecasts]. *XII ezhegodnaya konferentsiya "Rynki sortovogo prokata"*, Batumi, 13–14 oktyabrya, 2016 [XII Annual Conference "Markets of Rolled Products", Batumi, October 13–14, 2016], Batumi, 2016, pp. 35–40. (in Russ.)
2. Dalsky A.M., Gavriilyuk V.S., Bukharkin L.N., et al. *Tekhnologiya konstruktsionnykh materialov* [Technology of Construction Materials]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1990. 352 p.
3. Kolmogorov G.L., Kosheleva N.A. [Temperature Regimes and Critical Speeds during Wire Drawing]. *News of Higher Educational Institutions. Non-Ferrous Metallurgy*, 2016, no. 3, pp. 34–39. (in Russ.)
4. Smetneva N.Yu., Ivantsov A.B., Shishkov S.G. [Dynamics of Development of the Temperature Field of the Near-Surface Layer of Wire during Drawing]. *Ferrous Metallurgy*, 2017, no. 7, pp. 104–108. (in Russ.)
5. Anurev V.I. *Spravochnik konstruktora-mashinostroytelya* [Reference Designer-Mechanical Engineer]. 5th ed. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1979. 559 p.
6. *GOST 27365–87. Podshipniki rolikovyye konicheskiye odnoryadnyye povyshennoy gruzopod'yemnosti. Osnovnyye razmery.* [State Standard 27365–87. Bearings Roller Conic Single-Row Increased Load Capacity. Main Dimensions]. Moscow, IPK Publishing house of standards, 1988. 47 p.

7. Kolmogorov V.L. *Mekhanika obrabotki metallov davleniyem* [Mechanics of Metal Forming]. Publishing house of USTU – UPI, 2001. 835 p.
8. Vorontsov A.L. *Tekhnologicheskiye zadachi teorii plastichnosti* [Technological Problems of the Theory of Plasticity]. Moscow, Mashinostroenie-1 Publ., 2006. 475 p.
9. Storozhev M.V., Popov E.A. *Teoriya obrabotki metallov davleniyem* [Theory of Metal Forming]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1977. 424 p.
10. Gun G.Ya. *Teoreticheskiye osnovy obrabotki metallov davleniyem* [Theoretical bases of metal forming]. Moscow, Metallurgy Publ., 1980. 456 p.
11. Strugov S.S., Ivanov V.A., Sherkunov V.G. Comparison of Methods of Stress-Strain State Estimation in the Upset of a Cylindrical Workpiece. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2016, vol. 16, no. 4, pp. 140–146. (in Russ.) DOI: 10.14529/met160416
12. Dyomin D.O., Dyadichenko G.A. [Simulation of Wire Drawing Processes]. *Aerospace Technologies (ACT-2016). Proceedings of the XVII International Scientific and Technical Conference and the School of Young Scientists, Graduate Students and Students*, 2016, pp. 10–11. (in Russ.)
13. Smetneva N.Y., Ivantsov A.B., Shishkova SG [Compliance with the Experiment Results of Modeling in the Environment DEFORM Process of Heating the Wire during Drawing]. *Scientific Discussion: Questions of Technical Sciences*, 2016, no. 3, pp. 57–62 (in Russ.)
14. Golovizin G.N. [Evaluation of Strain Localization Efforts during Wire Drawing]. *Stal'*, 2014, no. 4, pp. 66–67 (in Russ.)
15. Bitkov V.V. [Efficiency of Using Prefabricated Fibers for Wire Drawing]. *Metal Technology*, 2015, no. 9, pp. 14–20. (in Russ.)

Received 13 November 2018

ОБРАЗЕЦ ЦИТИРОВАНИЯ

Авраменко, А.А. Определение распределения температурного поля при волочении стальной проволоки с целью обеспечения работоспособности и повышения долговечности узла роликовой волоки / А.А. Авраменко, С.С. Стругов // Вестник ЮУрГУ. Серия «Металлургия». – 2019. – Т. 19, № 1. – С. 67–73. DOI: 10.14529/met190108

FOR CITATION

Avramenko A.A., Strugov S.S. Determination of the Distribution of a Temperature Field in the Involvement of a Steel Wire in Order to Ensure the Working Capacity and Improve the Durability of the Roller Die. *Bulletin of the South Ural State University. Ser. Metallurgy*, 2019, vol. 19, no. 1, pp. 67–73. (in Russ.) DOI: 10.14529/met190108