

ТЕМПЕРАТУРНЫЕ РЕЖИМЫ И КРИТИЧЕСКИЕ СКОРОСТИ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ ПРОВОЛОКИ

© 2016 г. Г.Л. Колмогоров, Н.А. Кошелева

Пермский национальный исследовательский политехнический университет (ПНИПУ)

Статья поступила в редакцию 14.10.14 г., доработана 21.01.15 г., подписана в печать 28.09.15 г.

При производстве прутковых и проволочных изделий формируются остаточные напряжения. Причиной этого является как пластическая деформация, так и возможная термопластическая деформация, возникающая за счет контактного разогрева поверхности металлоизделий от сил внешнего трения. Нежелательные остаточные напряжения в поверхностных слоях влияют на точность металлоизделий и повышают вероятность их разрушения, что наблюдается в практике волочильного производства. В работе предложена методика определения условий контактного разогрева из критериев предотвращения образования остаточных напряжений. На основании уравнений термоупругости установлены температурные режимы, приводящие к появлению термопластических деформаций. Рассчитаны критические значения разности температур поверхности и центра протягиваемой проволоки, при которых происходит переход поверхностных слоев проволоки в пластическое состояние с последующим формированием остаточных напряжений. Определены предельные скорости волочения для ряда цветных металлов (медь, цирконий, титан), превышение которых приведет к нежелательным остаточным напряжениям в протягиваемом изделии. Для повышения критических скоростей в качестве рекомендаций предлагается реализация условий гидродинамического (жидкостного) режима трения при производстве металлоизделий.

Ключевые слова: волочение, термоупругое состояние, пластическое деформирование, температурные режимы, критические скорости волочения.

Колмогоров Г.Л. – докт. техн. наук, профессор кафедры динамики и прочности машин ПНИПУ (614990, г. Пермь, Комсомольский пр-т, 29). E-mail: dpm@pstu.ru.

Кошелева Н.А. – аспирант этой кафедры. E-mail: nataly.kosheleva@gmail.com.

Для цитирования: Колмогоров Г.Л., Кошелева Н.А. Температурные режимы и критические скорости при волочении проволоки // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2016. No. 3. С. 34–39.

DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2016-3-34-39.

Kolmogorov G.L., Kosheleva N.A.

Temperature modes and critical velocities during wire drawing

Rod and wire product manufacturing is usually accompanied by residual stresses. The reason for this is both plastic deformation and potential thermoplastic deformation that occurs due to the contact frictional heating of metal surfaces. Undesirable residual stresses in the surface layers affect the accuracy and increase the probability of hardware destruction that can be observed in drawing product manufacturing. The authors of the article propose a method of determining the contact heating conditions based on the criteria of residual stress prevention. Temperature conditions causing thermoplastic deformations are determined according to thermoelasticity equations. Critical values are calculated for the temperature difference between the center and the surface of the stretched wire, at which the latter transits to a plastic state followed by residual stress formation. The limiting drawing velocities for a number of non-ferrous metals (copper, zirconium, titanium) are defined. The excess of those top velocities will lead to undesirable residual stresses in the stretched product. It is proposed as a recommendation to increase the critical speed by creating hydrodynamic (fluid) friction conditions in metal products manufacturing.

Keywords: drawing, thermoelastic state, plastic deformation, temperature conditions, critical drawing velocities.

Kolmogorov G.L. – Dr. Sci. (Tech.), prof., Department of dynamics and strength of machines, Perm National Research Polytechnic University (PNRPU) (614990, Russia, Perm, Komsomolskii pr., 29). E-mail: dpm@pstu.ru.

Kosheleva N.A. – postgraduate student, Department of dynamics and strength of machines, PNRPU. E-mail: nataly.kosheleva@gmail.com.

Citation: Kolmogorov G.L., Kosheleva N.A. Temperaturnye rezhimy i kriticheskie skorosti pri volochenii provoloki. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2016. No. 3. P. 34–39. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2016-3-34-39.

Введение

Неблагоприятный температурный режим проволоки в процессе пластического деформирования является одной из причин образования оста-

точных напряжений при волочении. Разогрев поверхности проволоки возникает за счет действия сил внешнего трения на контактной поверхности

«протягиваемое изделие — волоочильный инструмент», что может отрицательно сказаться на качестве производимой продукции. Контактный разогрев может быть значительным и привести к образованию температурных напряжений, способных вызвать температурные пластические деформации и формирование при последующем охлаждении нежелательных остаточных напряжений в протянутом изделии. При пластическом деформировании волочением [1] в протягиваемых изделиях возникают остаточные напряжения [2], наличие которых для проволочных изделий нежелательно.

Целью работы является определение критических скоростей волочения для таких металлов, как медь, цирконий, титан, из условий предотвращения образования остаточных напряжений от термопластических деформаций.

Методика

На рис. 1 приведена традиционная схема волочения проволоки с диаметра d_0 на диаметр d_1 , где σ_0 — напряжение противонапряжения, σ_1 — напряжение волочения, v_0 и v_1 — скорость проволоки на входе и выходе соответственно.

При волочении за счет действия сил внешнего трения в зоне деформации происходит разогрев поверхностных слоев протягиваемого изделия [3]. При этом температура контактного слоя (T_k) определяется условиями волочения [4] и теплофизическими свойствами протягиваемого материала [5]:

$$T_k = T_0 + \frac{fK\sigma_1\eta}{c\gamma K_1(1-\eta)\sin\alpha_b}. \quad (1)$$

Здесь T_0 — температура центральных слоев проволоки; f — коэффициент трения в зоне деформации; $K\sigma_1$ — среднее контактное нормальное давление

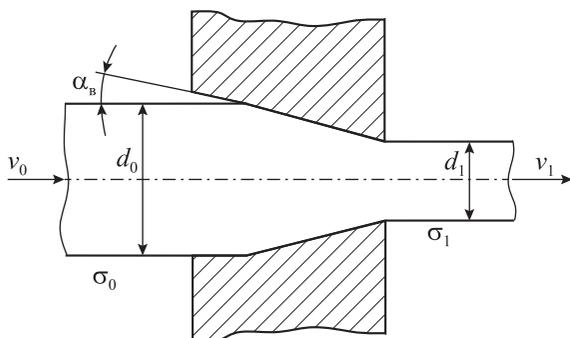


Рис. 1. Схема волочения проволоки

в зоне деформации; $\eta = (d_0^2 - d_1^2)/d_0^2$ — относительное обжатие; d_0 и d_1 — диаметры проволоки на входе в зону деформации и выходе из нее; c и γ — удельная массовая теплоемкость и плотность металла протягиваемой проволоки; α_b — угол наклона образующей рабочего конуса волюки к оси волочения; K_1 — коэффициент, характеризующий долю тепла, отводимого протягиваемой проволокой, зависящий от числа Пекле ($Pe = vd/a$) и от отношения длины зоны деформации к среднему диаметру: $l/d = (1 - \sqrt{1 - \eta}) / (1 + \sqrt{1 - \eta}) \operatorname{tg} \alpha_b$; v — средняя скорость движения проволоки в зоне деформации; $a = \lambda / (c\gamma)$ — коэффициент температуропроводности протягиваемого металла; λ — коэффициент теплопроводности.

Коэффициент K определяет среднее контактное давление в зоне деформации. Он зависит от условий волочения и схемы напряженного состояния. При наличии противонапряжения при волочении $K < 1,0$, в случае заднего подпора $K > 1,0$, при традиционном волочении $K = 1,0$ [6]. В выполненных расчетах $K = 1,0$.

Как следует из соотношения (1), в результате контактного разогрева между центральными и периферийными слоями протягиваемой проволоки образуется разность температур, величина которой определяется вторым слагаемым выражения (1). За счет разности температур в проволоке возникает термоупругое состояние [7], описываемое методами теории упругости.

Термоупругому состоянию проволоки в условиях плоской деформации ($\epsilon_z = 0$) будут соответствовать следующие выражения для компонентов тензора напряжений [8]:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{\alpha E}{1-\nu} \left(\frac{1}{R^2} \int_0^R T r dr - \frac{1}{r^2} \int_0^r T r dr \right), \\ \sigma_\theta &= \frac{\alpha E}{1-\nu} \left(\frac{1}{R^2} \int_0^R T r dr + \frac{1}{r^2} \int_0^r T r dr - T \right), \\ \sigma_z &= \frac{\alpha E}{1-\nu} \left(\frac{2\nu}{R^2} \int_0^R T r dr - T \right), \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

где α — коэффициент линейного расширения материала проволоки; E и ν — модуль упругости и коэффициент Пуассона соответственно; R — радиус проволоки; $T(r)$ — температурная функция.

Полагаем, что за счет действия сил внешнего трения в зоне деформации распределение температуры по сечению проволоки описывается экспоненциальной зависимостью вида $T = T_0 \exp(\beta r/R)$.

Обозначив температуру поверхности проволоки через $T_1 = T_k$, из условия $T_{r=R} = T_1$ найдем показатель β и получим окончательно температурную функцию, соответствующую распределению температуры по сечению проволоки в процессе волочения, в следующем виде:

$$T = T_0(T_1/T_0)^{\bar{r}}, \quad (3)$$

где $\bar{r} = r/R$ — безразмерная радиальная координата.

Зависимость (3) положена в основу последующих расчетов термоупругих напряжений, возникающих в проволоке за счет контактного разогрева. Подставляя выражение (3) в соотношения (2), после интегрирования и преобразований получим

$$\left. \begin{aligned} \sigma_r &= \frac{\alpha E T_0}{1-\nu} \left\{ \frac{1}{\ln\left(1+\frac{\Delta T}{T_0}\right)} \left[1 + \frac{\Delta T}{T_0} - \frac{1}{\bar{r}} \left(1 + \frac{\Delta T}{T_0} \right)^{\bar{r}} \right] + \right. \\ &+ \left. \frac{1}{\ln^2\left(1+\frac{\Delta T}{T_0}\right)} \left[\frac{1}{\bar{r}^2} \left(1 + \frac{\Delta T}{T_0} \right)^{\bar{r}} - \frac{1}{\bar{r}^2} - \frac{\Delta T}{T_0} \right] \right\}, \\ \sigma_\theta &= \frac{\alpha E T_0}{1-\nu} \left\{ \frac{1}{\ln\left(1+\frac{\Delta T}{T_0}\right)} \left[\frac{1}{\bar{r}} \left(1 + \frac{\Delta T}{T_0} \right)^{\bar{r}} - \frac{1}{\bar{r}^2} - \frac{\Delta T}{T_0} \right] + \right. \\ &+ \left. \frac{1}{\ln^2\left(1+\frac{\Delta T}{T_0}\right)} \left[\frac{1}{\bar{r}^2} - \frac{1}{\bar{r}^2} \left(1 + \frac{\Delta T}{T_0} \right)^{\bar{r}} - \frac{\Delta T}{T_0} \right] - \left(1 + \frac{\Delta T}{T_0} \right)^{\bar{r}} \right\}, \\ \sigma_z &= \frac{\alpha E}{1-\nu} \frac{2T_0\nu}{\ln\left(1+\frac{\Delta T}{T_0}\right)} \left[1 + \frac{\Delta T}{T_0} - \frac{\Delta T}{T_0 \ln\left(1+\frac{\Delta T}{T_0}\right)} - \right. \\ &\left. - \frac{1}{2} \left(1 + \frac{\Delta T}{T_0} \right)^{\bar{r}} \ln\left(1+\frac{\Delta T}{T_0}\right) \right]. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

Здесь $\Delta T = T_1 - T_0$ — разность температур поверхности и центра протягиваемой проволоки и в выполненных расчетах соответствует второму слагаемому выражения (1).

Численный анализ соотношений (4) говорит о том, что наибольшие температурные напряжения возникают в поверхностных слоях проволоки ($\bar{r} =$

$= 1$). Для поверхности выражения (4) примут следующий вид [9]:

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{r/\bar{r}=1} &= 0, \\ \sigma_{\theta/\bar{r}=1} &= \frac{\alpha E T_0}{1-\nu} \left[\frac{2(1+\Delta T/T_0)}{\ln(1+\Delta T/T_0)} - \right. \\ &- \left. \frac{2\Delta T}{T_0 \ln^2(1+\Delta T/T_0)} - \left(1 + \frac{\Delta T}{T_0} \right) \right], \\ \sigma_{z/\bar{r}=1} &= \nu \sigma_{\theta/\bar{r}=1}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Последнее из соотношений (5) следует из закона Гука для осесимметричного напряженного состояния при $\sigma_{r/\bar{r}=1} = 0$ и $\varepsilon_z = 0$.

Появлению остаточных напряжений в поверхностных слоях проволоки предшествует переход протягиваемого металла из упругого в пластическое состояние. Для оценки этого перехода используем критерий удельной энергии формоизменения (условие Хубера—Мизеса) [10]:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\sigma_r - \sigma_\theta)^2 + (\sigma_\theta - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_r)^2} = \sigma_T,$$

где σ_i — интенсивность напряжений; σ_T — предел текучести протягиваемого металла.

Условие пластичности для поверхностных слоев упрощается и принимает вид

$$\sigma_\theta \sqrt{1-\nu+\nu^2} = \sigma_T(T). \quad (6)$$

Для оценки нежелательных режимов волочения при производстве проволоки волочением была использована вышеприведенная методика. Определение критических скоростей волочения для таких металлов, как медь, цирконий, титан, было сделано из условий предотвращения образования остаточных напряжений от термопластических деформаций [11]. При этом контактный разогрев соответствует паре трения «медь — волочильный инструмент», «цирконий — волочильный инструмент», «титан — волочильный инструмент», поэтому в проведенных расчетах учитывались теплофизические характеристики меди, циркония и титана [12]. Следует отметить, что в ряде случаев наличие остаточных напряжений в поверхностных слоях крайне нежелательно ввиду труднопрогнозируемых последствий [13, 14].

Обсуждение полученных результатов

В соответствии с приведенными формулами выполнены расчеты величин $\Delta T/T_0$ и скоростей

волочения для различных металлов. На рис. 2 приведена расчетная зависимость отношения $\Delta T/T_0$ от предела текучести (σ_T) для различных значений T_0 , полученная из условия (6) с учетом выражения для σ_θ из соотношений (5). Расчет выполнен для медной проволоки при $\nu = 0,32$, $\alpha = 1,7 \cdot 10^{-5}$ град $^{-1}$, $E = 1,1 \cdot 10^5$ МПа. Из рис. 2 видно, что отношение $\Delta T/T_0$ с увеличением σ_T возрастает, а с повышением T_0 уменьшается.

С помощью рис. 2 по известному значению $K\sigma_T \approx \sigma_T$ для определенной величины T_0 находится отношение $\Delta T/T_0$ и рассчитывается критическое значение ΔT , при котором происходит переход поверхностных слоев проволоки в пластическое состояние с последующим формированием остаточных напряжений.

По известному значению ΔT из второго слагаемого соотношения (1) определяется критическое значение K_1 , соответствующее переходу в пластическое состояние из-за температурных напряжений, по которому, в свою очередь, находится критическое значение числа Пекле и рассчитывается критическая скорость волочения: $v_{кр} = Re_{кр} a/d$.

На рис. 3 приведены расчетные зависимости критических скоростей волочения от значений σ_T для различных диаметров проволоки и значений T_0 . Расчеты выполнены для условий граничного трения $f = 0,06$ и относительного обжатия $\eta = 0,32$.

Из рис. 3 видно, что с увеличением параметра σ_T и диаметра проволоки критические скорости волочения снижаются.

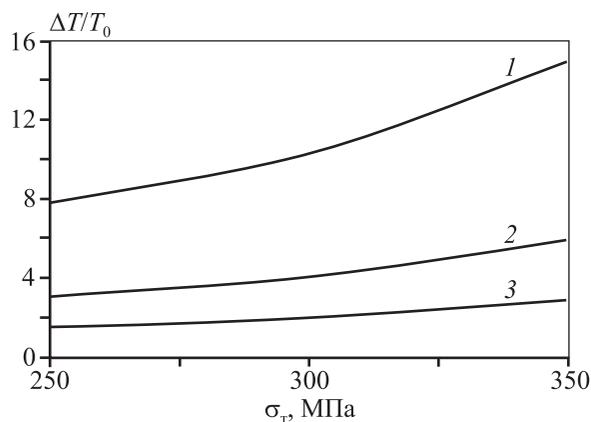


Рис. 2. Расчетная зависимость отношения $\Delta T/T_0$ от предела текучести медной проволоки для различных значений T_0
 T_0 , °C: 20 (1), 50 (2), 100 (3)

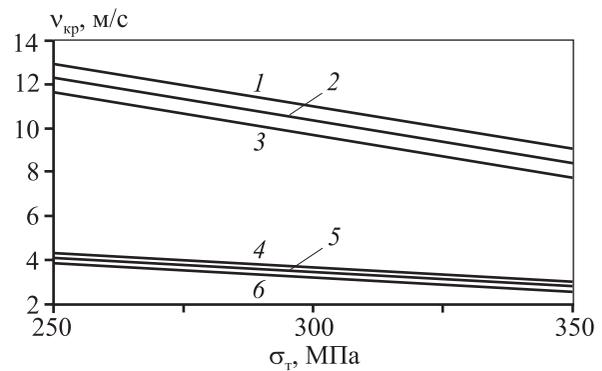


Рис. 3. Расчетные величины критических скоростей волочения медной проволоки в зависимости от предела текучести для различных значений T_0 и d
 $d = 1$ мм (1–3) и 2 мм (4–6)
 T_0 , °C: 100 (1, 4), 50 (2, 5), 20 (3, 6)

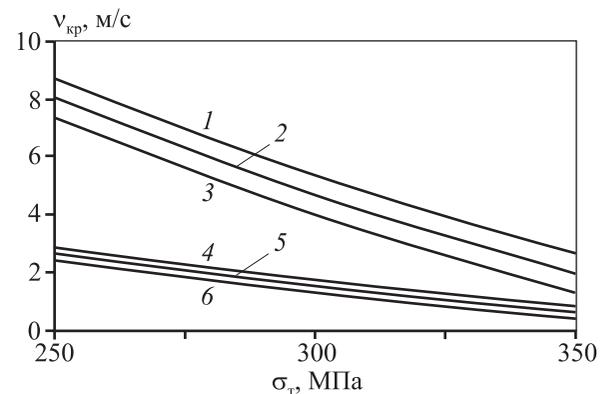


Рис. 4. Расчетные величины критических скоростей волочения циркониевой проволоки в зависимости от предела текучести для различных значений T_0 и d
 $d = 1$ мм (1–3) и 2 мм (4–6)
 T_0 , °C: 100 (1, 4), 50 (2, 5), 20 (3, 6)

Приведенные на рис. 3 зависимости позволяют оценить скорости волочения, превышение которых приведет к появлению нежелательных остаточных напряжений в результате перехода поверхности проволоки в пластическое состояние из-за температурных напряжений за счет разогрева сил контактного трения в зоне деформации.

Аналогичный расчет выполнен для циркониевой проволоки при $\nu = 0,35$, $\alpha = 6,9 \cdot 10^{-6}$ град $^{-1}$, $E = 9,7 \cdot 10^5$ МПа. Результаты расчета критических скоростей волочения циркониевой проволоки при $f = 0,06$ и $\eta = 0,32$ представлены на рис. 4.

На рис. 5 приведена расчетная зависимость критических скоростей волочения титановой проволоки для различных ее диаметров и значений T_0 при $\nu = 0,32$, $\alpha = 8,2 \cdot 10^{-5}$ град $^{-1}$, $E = 1,16 \cdot 10^5$ МПа. Расчеты выполнены для $f = 0,06$ и $\eta = 0,32$.

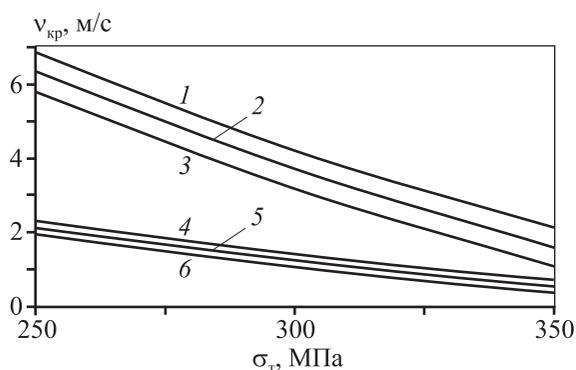


Рис. 5. Расчетные величины критических скоростей волочения титановой проволоки в зависимости от предела текучести для различных значений T_0 и d
 $d = 1$ мм (1–3) и 2 мм (4–6)
 T_0 , °C: 100 (1, 4), 50 (2, 5), 20 (3, 6)

Как следует из представленных результатов расчета, критические скорости волочения из условий возможного формирования остаточных напряжений сравнительно невелики. Существенное повышение критических скоростей может быть достигнуто за счет снижения коэффициента трения при реализации условий гидродинамического (жидкостного) трения (условий смазки) [5, 15] при производстве металлоизделий.

Выводы

На основании уравнений термоупругости определены температурные режимы, приводящие к появлению термопластических деформаций и возможному формированию в последующем остаточных напряжений.

Из условий контактного разогрева найдены критические скорости волочения медной, циркониевой и титановой проволок, превышение которых обуславливает возникновение нежелательных остаточных напряжений.

Данная работа выполнена при финансовой поддержке гранта Российского фонда фундаментальных исследований №13-08-01169.

Литература

1. *Hernan A., Rojasa G., Calveta J.V., Bubnovichb V.I.* A new analytical solution for prediction of forward tension in the drawing process // *J. Mater. Process. Technol.* 2008. Vol. 198. Iss. 1–3. P. 93–98.

2. *Crina A., Monica I.* Determination of residual stresses distribution within the formed part // *Fascicle Manag. Technol. Eng.* 2008. Vol. VII (XVII). P. 54–58.
3. *Wistreich J.G.* The fundamentals of wire drawing // *Metall. Rev.* 1958. Vol. 3. Iss. 10. P. 97–142.
4. *Коврев Г.С., Забрянский Б.А., Попов А.П.* Исследование остаточных упругих напряжений в проволоке из труднодеформируемых сплавов // *Вестн. Моск. гос. открытого ун-та. Сер. Техника и технология.* 2011. No. 4. С. 5–13.
5. *Колмогоров Г.Л.* Гидродинамическая смазка при обработке металлов давлением. М.: Металлургия, 1986.
6. *Колмогоров В.Л., Орлов С.И., Селищев К.П.* Волочение в режиме жидкостного трения. М.: Металлургия, 1967.
7. *Ulutan D., Erdem Alaca B., Lazoglu I.* Analytical modelling of residual stresses in machining // *J. Mater. Process. Technol.* 2007. Vol. 183. P. 77–87.
8. *Тимошенко С.П., Гудьер Дж.* Теория упругости. М.: Наука, 1975.
9. *Kachanov L.M.* Fundamentals of the theory of plasticity. N.Y.: Courier Dover Publ., 2004.
10. *Малинин Н.Н.* Прикладная теория пластичности и ползучести. М.: Машиностроение, 1975.
11. *Avitzur B.* Metal forming: processes and analysis. N.Y.: McGraw-Hill Book Co., 1968.
12. *Третьяков А.В., Зюзин В.И.* Механические свойства металлов и сплавов при обработке давлением. М.: Металлургия, 1973.
13. *Колмогоров Г.Л., Трофимов В.Н., Штуца М.Г., Чернова Т.В.* Механика пластического деформирования трансверсально-изотропных композиционных сверхпроводниковых материалов. Пермь: ПНИПУ, 2011.
14. *Vega G., Haddi A., Imad A.* Temperature effects on wire-drawing process: experimental investigation // *Int. J. Mater. Form.* 2009. Vol. 2. Suppl. 1. P. 229–232.
15. *Marciniak Z., Duncan J.L., Hu S.J.* Mechanics of sheet metal forming. 2-nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002.

References

1. *Hernan A., Rojasa G., Calveta J.V., Bubnovichb V.I.* A new analytical solution for prediction of forward tension in the drawing process. *J. Mater. Process. Technol.* 2008. Vol. 198. Iss. 1–3. P. 93–98.
2. *Crina A., Monica I.* Determination of residual stresses distribution within the formed part. *Fascicle Manag. Technol. Eng.* 2008. Vol. VII (XVII). P. 54–58.

3. *Wistreich J.G.* The fundamentals of wire drawing. *Metall. Rev.* 1958. Vol. 3. Iss. 10. P. 97–142.
4. *Kovrev G.S., Zabryanskii B.A., Popov A.P.* Issledovanie ostatochnykh uprugikh napryazhenii v provoloke iz trudnodeformiruemykh splavov [Investigation of residual elastic stresses in the wire made of hard-alloy]. *Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo otkrytogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologiya.* 2011. No. 4. P. 5–13.
5. *Kolmogorov G.L.* Gidrodinamicheskaya smazka pri obrabotke metallov davleniem [Hydrodynamic lubrication for metal forming]. Moscow: Metallurgiya, 1986.
6. *Kolmogorov V.L., Orlov S.I., Selishchev K.P.* Volochenie v rezhime zhidkostnogo treniya [Drawing in the mode of liquid friction]. Moscow: Metallurgiya, 1967.
7. *Ulutan D., Erdem Alaca B., Lazoglu I.* Analytical modeling of residual stresses in machining. *J. Mater. Process. Technol.* 2007. Vol. 183. P. 77–87.
8. *Timoshenko S.P., Goodyear J.* Teoriya uprugosti [Theory of elasticity]. Moscow: Nauka, 1975.
9. *Kachanov L.M.* Fundamentals of the theory of plasticity. N.Y.: Courier Dover Publ., 2004.
10. *Malinin N.N.* Prikladnaya teoriya plastichnosti i polzuchesti [Applied theory of plasticity and creep]. Moscow: Mashinostroenie, 1975.
11. *Avitzur B.* Metal forming: processes and analysis. N.Y.: McGraw-Hill Book Co., 1968.
12. *Tret'yakov A.V., Zyuzin V.I.* Mekhanicheskie svoystva metallov i splavov pri obrabotke davleniem [The mechanical properties of metals and alloys under pressure treatment]. Moscow: Metallurgiya, 1973.
13. *Kolmogorov G.L., Trofimov V.N., Shtutsa M.G., Chernova T.V.* Mekhanika plasticheskogo deformirovaniya transversal'no-izotropnykh kompozitsionnykh sverkhprovodnikovykh materialov [Mechanics of transversely-isotropic plastic deformation of composite superconductor]. Perm: PNRPU, 2011.
14. *Vega G., Haddi A., Imad A.* Temperature effects on wire-drawing process: experimental investigation. *Int. J. Mater. Form.* 2009. Vol. 2 Suppl. 1. P. 229–232.
15. *Marciniak Z., Duncan J.L., Hu S.J.* Mechanics of sheet metal forming. 2-nd ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2002.