

УДК 621.778

ПОВЫШЕНИЕ СТАБИЛЬНОСТИ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОВОЛОКИ ОТ ДЕЙСТВИЯ ПРОТИВОНАТЯЖЕНИЯ ПРИ НЕПОСТОЯННОМ КОЭФФИЦИЕНТЕ ТРЕНИЯ

Гурьянов Г.Н.¹, к.т.н., доцент, старший научный сотрудник (ggnbelorhome@rambler.ru)

Калугина О.Б.², к.т.н., старший преподаватель кафедры информатики
и информационной безопасности (kalugina.olga@bk.ru)

¹ Научно-исследовательский институт метизной промышленности (ОАО «НИИметиз»)
(453037, Россия, Челябинская обл., Магнитогорск, ул. Грязнова, 44/1)

² Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова
(455000, Россия, Челябинская обл., Магнитогорск, пр. Карла Маркса, 38)

Аннотация. При волочении проволоки нестабильность параметров деформации вызывает переменное осевое напряжение. Условия контактного трения изменяются в наиболее короткий отрезок времени и зависят от многих факторов: однородности по длине протягиваемой заготовки физико-механических свойств обрабатываемого материала, качества технологической смазки, стабильности силы натяжения заготовки на входе очага деформации и интенсивности охлаждения волок, вытяжных барабанов, шайб, направляющих роликов и т.п. Для оценки влияния коэффициента трения на стабильность силы (напряжения) волочения использована относительная величина первой производной по коэффициенту трения уравнения для напряжения волочения. Эта величина определена как отношение значений производной и исходного предела текучести материала проволоки, что позволяет выполнять сравнение производных при разных значениях исходного предела текучести материала проволоки. Производная рассчитана для уравнения, определяющего осевое напряжение с учетом действия противонапряжения, изменения предела текучести вдоль длины очага пластической деформации и уменьшения радиального напряжения в калибрующем пояске от прироста осевого напряжения в рабочем конусе волоки. Построены зависимости от напряжения противонапряжения и коэффициента трения для относительной величины первой производной при разных моделях упрочнения и параметрах деформации. Величина производной уменьшается при росте напряжения противонапряжения, что указывает на целесообразность волочения с противонапряжением с целью стабилизации силы волочения и снижения усталостного износа рабочей поверхности волоки. Показана зависимость исследуемой величины производной от принятой формулы для ее расчета. Рассмотрен процесс волочения, когда величина коэффициента трения постоянная в калибрующем пояске и переменная в рабочем конусе волоки. Для этого процесса также определена относительная величина первой производной по коэффициенту трения уравнения для осевого напряжения. Калибрующий пояс выполняет стабилизирующее действие на напряжение (силу) волочения, если величина коэффициента трения в нем постоянная. Нестабильность напряжения волочения от отклонения номинальной величины коэффициента трения зависит от значений других параметров деформации. Например, величина производной увеличивается с уменьшением угла волочения. Установленный характер влияния параметров деформации на стабильность напряжения волочения при переменной величине коэффициента трения не противоречит результатам исследования М.В. Бровмана, а также согласуется с известными данными, полученными на основе расчета осевого напряжения при номинальной коэффициенте трения и отклонении его в сторону увеличения и уменьшения. Повышение стабильности напряжения (силы) волочения положительно влияет на качество проволоки, эксплуатационную стойкость узлов и элементов волочильного стана, например, из-за снижения усталостного износа рабочих поверхностей волок, барабанов, обводных и рихтующих роликов. Волочение с противонапряжением и применение специальных конструкций волочильного инструмента стабилизируют напряженное состояние в очаге деформации проволоки.

Ключевые слова: волочение, проволока, противонапряжение, осевое напряжение, запас прочности, калибрующий пояска волоки, коэффициент контактного трения, интенсивность деформационного упрочнения, стабилизация силы волочения, усталостный износ.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-4-315-323

СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА ИССЛЕДОВАНИЯ

В процессе волочения изменяются реологические свойства смазки и обрабатываемого материала проволоки (прутка), микрорельеф геометрии поверхностей рабочего канала волоки и протягиваемой заготовки, условия подачи смазки в очаг деформации, интенсивность его охлаждения. Все это влияет на величину коэффициента контактного трения [1 – 4]. В результате возникает нестабильность силы волочения и других энергосиловых показателей пластического формоизменения заготовки [5 – 7], что снижает эксплуатационную

стойкость узлов и элементов волочильного стана [8]. Для стабилизации силы волочения круглого сплошного профиля предложены различные конструкции инструмента [9 – 11]. В настоящее время недостаточно данных о характере влияния противонапряжения на напряженное состояние при непостоянных значениях параметров деформации, в частности коэффициента контактного трения [12 – 16]. В работе [15] показан размах изменения силы волочения при отклонении значений угла α рабочего конуса волоки и коэффициента f трения от своих номинальных величин. Этот размах зависит не только от величины соответствующего отклонения угла α и

коэффициента f , но и от значений других параметров деформации. Влияние нестационарной величины коэффициента трения на напряжение волочения при разных моделях упрочнения и параметрах деформации приведено в работе [8]. Для оценки возможных колебаний усилия и напряжения волочения при отклонении предела текучести, коэффициента трения и геометрии рабочего канала волокна от их номинальных размеров [6] использована формула для расчета напряжения волочения [17]. Для этого определены первые производные уравнения для напряжения по параметрам деформации, получившим отклонение своих значений. По величине первой производной и размаха колебания нестационарного параметра деформации оценивали возможное изменение напряжения волочения от колебания этого параметра [6]. При этом принятая формула для расчета напряжения волочения не учитывает напряжение противонапряжения и включает усредненную величину предела текучести в очаге пластической деформации. Поэтому не определено влияние противонапряжения на размах колебания напряжения волочения при отклонении значений параметров деформации, в частности при нестабильной величине коэффициента трения.

Цель настоящей работы – при разных параметрах деформации проволоки показать характер влияния противонапряжения на размах колебания напряжения волочения при нестабильной величине коэффициента трения.

ПРИНЯТЫЕ МОДЕЛИ УПРОЧНЕНИЯ И ФОРМУЛЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ОСЕВОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Приняли зависимость предела текучести обрабатываемого металла от величины вытяжки μ в виде степенной функции:

$$\sigma_{Si} = \sigma_{S_0} \mu^k, \quad (1)$$

где σ_{S_0} – предел текучести заготовки перед обжатием; $\mu = \left(\frac{r_0}{r_k}\right)^2$ – коэффициент вытяжки; r_0 и r_k – радиус заготовки до и после деформации; k – коэффициент упрочнения.

Эмпирическая зависимость (1) адекватно отражает изменение прочностных свойств при холодном волочении патентованной углеродистой заготовки [5].

Расчет основной составляющей полного осевого напряжения на выходе волокна (прироста осевого напряжения в рабочем конусе волокна) выполнили по формуле [5]:

$$\sigma_{Z_1} = \sigma_{S_0} \frac{(\mu^k - 1)(1 + f \operatorname{ctg} \alpha)}{k}, \quad (2)$$

где f – коэффициент трения; α – угол наклона образующей рабочего конуса к оси волочения.

При расчете σ_{Z_1} по формуле (2) учитывается непрерывное изменение предела текучести и радиального напряжения вдоль длины очага деформации согласно зависимости (1). Прирост осевого напряжения от приложения напряжения противонапряжения при принятом законе упрочнения (1) и использовании формулы (2) определили как [5]

$$\sigma_{Z_2} = \sigma_q \left(1 - \frac{f(\mu^k - 1)}{k \operatorname{tg} \alpha} \right), \quad (3)$$

где σ_q – напряжение противонапряжения.

Прирост осевого напряжения σ_{Z_3} , вызванный деформацией сдвига металла, рассчитывали по известной в теории волочения формуле $\sigma_{Z_3} = 4\sigma_S \frac{\operatorname{tg} \alpha}{3 \cdot \sqrt{3}}$ (здесь

$\sigma_S = \frac{\sigma_{S_0} + \sigma_{S_k}}{2}$ – средний предел текучести металла

в очаге деформации; σ_{S_k} – предел текучести на выходе очага пластической деформации).

Перед входом калибрующего пояска волокна имеем осевое напряжение

$$\sigma_{Z_k} = \sigma_{Z_1} + \sigma_{Z_2} + \sigma_{Z_3}. \quad (4)$$

Прирост осевого напряжения в пояске волокна длиной L равен [5]

$$\sigma_{Z_4} = \frac{2fL(\sigma_{S_k} - \sigma_{Z_k})}{r_k} = \frac{2\sigma_{S_k}fL \left(1 - \frac{\sigma_{Z_k}}{\sigma_{S_k}} \right)}{r_k}. \quad (5)$$

Полное осевое напряжение или напряжение волочения определяется по следующей формуле:

$$\sigma_Z = \sigma_{Z_k} + \sigma_{Z_4}. \quad (6)$$

Абсолютный запас прочности проволоки на выходе волокна может быть рассчитан по уравнению

$$Za = \sigma_{S_k} - \sigma_Z. \quad (7)$$

Величина абсолютного запаса прочности равна модулю радиального напряжения, что следует из уравнения пластичности. При нулевом значении Za наступает предельный случай волочения, когда возможен обрыв тянущего переднего конца проволоки.

Пусть при волочении проволоки изменяются условия контактного трения в рабочем конусе и калибрующем пояске волокна. Это приводит к переменному напряженному состоянию рабочей поверхности волокна [8, 11, 18, 19]. Определим уравнения первой производной осевого напряжения σ_Z по коэффициенту трения при отсутствии и наличии калибрующего пояска. Формула для расчета этого параметра по коэффициен-

ту трения при наличии калибрующего пояска не приводится по причине ее громоздкости. При отсутствии пояска производная равна

$$\frac{d\sigma_z}{df} = \frac{\sigma_{s_0}(\mu^k - 1) \left(1 - \frac{\sigma_q}{\sigma_{s_0}}\right)}{k \operatorname{tg} \alpha}. \quad (8)$$

Производная имеет размерность напряжения. Выражение (8) не включает коэффициент трения, т.е. производная не зависит от коэффициента f . Прирост осевого напряжения от действия напряжений контактного трения на выходе рабочего конуса волокна определяется интегрированием уравнения (8). Использовали относительную величину производной (8):

$$\frac{\frac{d\sigma_z}{df}}{\sigma_{s_0}} = \frac{d\bar{\sigma}_z}{df}. \quad (9)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТОВ И ИХ АНАЛИЗ

На рис. 1 приведена зависимость относительной величины производной (9) от напряжения противонапряжения. Графики построены при исходном пределе текучести 1000 МПа и коэффициентах упрочнения 0,25 и 0,75, коэффициентах вытяжки 1,25 и 1,50, коэффициентах трения 0,05 и 0,15. Волочение осуществляется через волокна без калибрующего пояска и с пояском, радиус и длина которого равны 1 мм. Значения угла α образующей рабочего канала к оси волочения составили 6 и 16°.

Величина производной снижается с ростом напряжения противонапряжения при разных значениях коэффициентов вытяжки, трения, упрочнения и угла α . При отсутствии калибрующего пояска увеличение коэффициента трения от 0,05 до 0,15 не привело к изменению производной, что следует из формулы (7). Поэтому, например, линии с нечетными номерами 3 и 7 (рис. 1, а, в) имеют одинаковое расположение. При наличии калибрующего пояска (четные номера линий) с ростом напряжения противонапряжения наблюдается более интенсивное снижение производной при меньшей (0,05) величине коэффициента трения (рис. 1, а, б). Но это снижение начинается при значительно большей величине производной при отсутствии противонапряжения. Таким образом, при меньшей исходной величине коэффициента трения колебания его величины в большей степени оказывают влияние на стабильность напряженного состояния. И при этом более эффективно применение противонапряжения для стабилизации осевого напряжения.

Сравнение расположения пар линий 1 и 5, 3 и 7 при отсутствии калибрующего пояска, а также пар линий 2 и 6, 4 и 8 при его наличии показывает увеличение производной в зависимости от роста коэффициента упрочнения от 0,25 до 0,75. Это увеличение больше при наличии пояска, величине $\mu = 1,5$ (рис. 1, б, г) и меньшем значении коэффициента трения 0,05, что показывают пары линий 2 и 6, 4 и 8 на рис. 1, б. С повышением обжатия (рис. 1, б, г) выросла величина производной при $f = 0,05$ и $f = 0,15$, если отсутствует калибрующий поясок (нечетные номера линий). Это показывает парное сравнение расположения соответствующих линий на рис. 1, а и б, в и г. Однако при наличии калибрующего

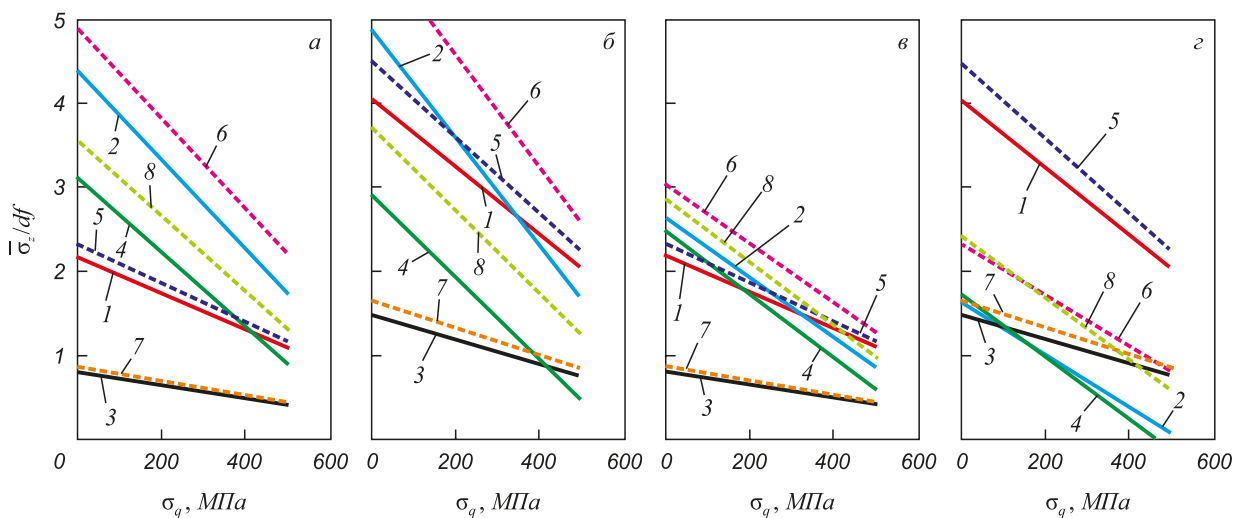


Рис. 1. Зависимость производной $d\bar{\sigma}_z/df$ (осевого напряжения волочения по коэффициенту трения) от напряжения противонапряжения: а, б – $f = 0,05$; в, г – $f = 0,15$; а, в – $\mu = 1,25$; б, г – $\mu = 1,5$; 1 – 4 – $k = 0,25$ (сплошные линии); 5 – 8 – $k = 0,75$ (штриховые линии); нечетные номера кривых – отсутствует поясок; четные – поясок с радиусом и длиной 1 мм; 1, 2, 5, 6 – $\alpha = 6^\circ$; 3, 4, 7, 8 – $\alpha = 16^\circ$

Fig. 1. Dependence of $d\bar{\sigma}_z/df$ derivative (axial stress of drawing by friction coefficient) on backward pull stress: а, б – $f = 0,05$; в, г – $f = 0,15$; а, в – $\mu = 1,25$; б, г – $\mu = 1,5$; 1 – 4 – $k = 0,25$ (solid lines); 5 – 8 – $k = 0,75$ (dash lines); odd numbers of curves – no cylinder; even numbers – cylinder with radius and length of 1mm; 1, 2, 5, 6 – $\alpha = 6^\circ$; 3, 4, 7, 8 – $\alpha = 16^\circ$

пояска величина производной находится в сложной зависимости от коэффициента вытяжки. Линия 4 ($f = 0,15$; $\mu = 1,5$; длина пояска 1 мм) на рис. 1, z пересекает ось абсцисс при высоком напряжении противонапряжения. При значениях напряжения противонапряжения, лежащих правее точки пересечения линии 4 и абсциссы, производная меньше нуля. Расчеты показали, что при нулевой и отрицательной величине производной (9) запас прочности Za меньше нуля при параметрах деформации, при которых построена зависимость (4). Более того, отрицательная величина Za может быть при положительной производной (9). В частности, участки в конце линий 2 и 4 (рис. 1, z) проведены при заметном отрицательном запасе прочности, который не может реализоваться на практике. Таким образом, необходим соответствующий расчет запаса прочности для обоснованного вывода о характере влияния параметров деформации на энергосиловые показатели процесса волочения.

Пусть $\frac{d\bar{\sigma}_z}{df} = 2$, тогда $\frac{d\sigma_z}{df} = 2\sigma_{s_0} = 2000$ МПа, а величина отклонения напряжения волочения при изменении номинального коэффициента трения на величину $\Delta f = 0,05$ равна 100 МПа или 10 % от исходного (1000 МПа) предела текучести.

Зависимости производной от коэффициента трения (рис. 2) позволяют уточнить характер влияния коэффициентов вытяжки, трения и упрочнения, величины угла α и напряжения противонапряжения σ_q на величину производной (9). Расчет выполнен при разной величине угла α (6, 9 и 16°), отсутствии противонапряжения и напряжении противонапряжения 250 (рис. 2, $a, б$) и 400

(рис. 2, $в, z$) МПа. Коэффициент упрочнения k равен 0,25, 0,75, 1,37 и 2,0 (соответственно рис. 2, поз. $a, б, в$ и z). Калибрующий поясок отсутствует (прямые 1 и 3) и его длина равна 1 мм при диам. 2,0 мм (остальные прямые). Коэффициент вытяжки равен 1,25 и 1,50.

Линии 1 – 4 построены при коэффициенте вытяжки 1,50, а линии 5 – 7 – при $\mu = 1,25$ (рис. 2, $a, б$). При отсутствии пояска (линии 1 и 3) производная (9) не зависит от коэффициента трения. Линия 1 при отсутствии противонапряжения показывает более высокую величину производной, чем аналогичная величина при наличии противонапряжения – уравнение (3). Наклон линий при $\mu = 1,50$ больше, чем при $\mu = 1,25$. Из сравнения расположения пар линий 2 и 5 при отсутствии противонапряжения, 4 и 6 при $\sigma_q = 250$ МПа соответственно при коэффициентах вытяжки 1,50 и 1,25 следует, что производная меньше при $\mu = 1,50$, если коэффициент трения больше 0,1 (рис. 2, $a, б$): то есть при $\mu = 1,50$ стабильность напряжения (силы) волочения при неустойчивом режиме трения выше при более высоких значениях коэффициента трения. Линии 2 и 4 ниже оси абсцисс при значительном ($f > 0,2$) коэффициенте трения. Но при этих значениях коэффициентов трения и упрочнения 0,25 и 0,75 (рис. 2, $a, б$ соответственно) запас прочности меньше нуля.

При $k = 1,37$ зависимости (2), (4) и (6) и при $k = 2,00$ (линия $б$) производная меньше нуля также при больших значениях коэффициента трения (рис. 2, $в, z$). При отсутствии противонапряжения (линия 2) и напряжении противонапряжения 400 МПа зависимости (4) и (6), запас прочности отрицательный, когда производная (9) мень-

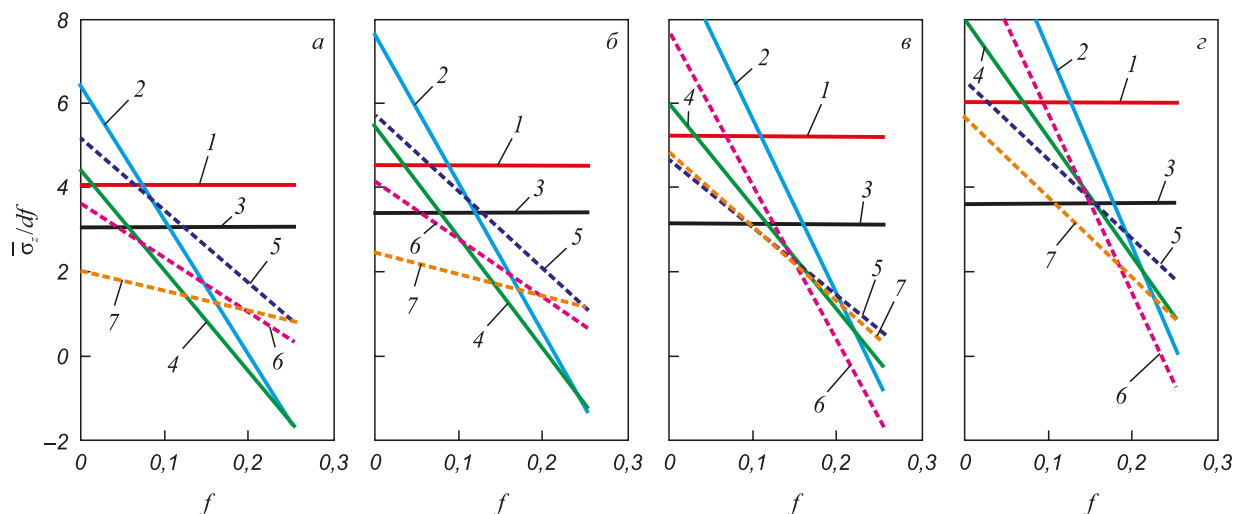


Рис. 2. Производная (9) в зависимости от коэффициента трения:

$a - k = 0,25$; $б - k = 0,75$; $в - k = 1,37$; $z - k = 2,00$; 1 – 4 – $\mu = 1,50$ (сплошные линии); 5 – 7 – $\mu = 1,25$ (штриховые линии); 1, 3 – $L = 0$; 2, 4 – 7 – $L = 1$ мм; 1 – 6 – $\alpha = 6^\circ$; 7 – $\alpha = 16^\circ$; 1, 2, 5 – $\sigma_q = 0$; 3, 4, 6, 7 – $\sigma_q = 250$ МПа для поз. $a, б$; 1 – 6 – $\mu = 1,50$; 7 – $\mu = 1,25$; 1 – 4 – $\alpha = 6^\circ$; 5 – $\alpha = 9^\circ$; 6, 7 – $\alpha = 4^\circ$; 1, 3 – $L = 0$; 2, 4 – 7 – $L = 1$ мм; 1, 2 – $\sigma_q = 0$; 3 – 7 – $\sigma_q = 400$ МПа для поз. $в, z$

Fig. 2. Derivative (9) depending on friction coefficient:

$a - k = 0,25$; $б - k = 0,75$; $в - k = 1,37$; $z - k = 2,00$; 1 – 4 – $\mu = 1,50$ (solid lines); 5 – 7 – $\mu = 1,25$ (dash lines); 1, 3 – $L = 0$; 2, 4 – 7 – $L = 1$ mm; 1 – 6 – $\alpha = 6^\circ$; 7 – $\alpha = 16^\circ$; 1, 2, 5 – $\sigma_q = 0$; 3, 4, 6, 7 – $\sigma_q = 250$ MPa for pos. $a, б$; 1 – 6 – $\mu = 1,50$; 7 – $\mu = 1,25$; 1 – 4 – $\alpha = 6^\circ$; 5 – $\alpha = 9^\circ$; 6, 7 – $\alpha = 4^\circ$; 1, 3 – $L = 0$; 2, 4 – 7 – $L = 1$ mm; 1, 2 – $\sigma_q = 0$; 3 – 7 – $\sigma_q = 400$ MPa for pos. $в, z$

ше и равна нулю (рис. 2, в). Отрицательный запас вызван высоким уровнем напряжения противонапряжения, зависимости (4) и (6), наличием калибрующего пояска (линия 2) при высоком коэффициенте трения. Линия 5 при большем значении угла α (9°) в отличие от линий 4 и 6 не пересекает абсциссу, так как при наличии пояска с увеличением угла μ повышается производная (9). Линия 7 при $\mu = 1,25$ также не достигает абсциссы. Необходимо отметить, что при повышенных значениях коэффициента f производная меньше при наличии калибрующего пояска, чем при его отсутствии. Это видно из сравнения расположения, например, при $\alpha = 6^\circ$ линий 1 и 2 при отсутствии противонапряжения, 3 и 4 – при действии противонапряжения. Таким образом, поясок является стабилизатором напряжения волочения при повышенном коэффициенте трения.

При отсутствии калибрующего пояска из формулы (8) следует снижение производной с ростом угла α . При наличии пояска зависимость производной от величины угла α более сложная. Например, зависимости (6) и (7) на рис. 2, а, б построены соответственно при $\alpha = 6^\circ$ и $\alpha = 16^\circ$ (коэффициент вытяжки 1,25; напряжение противонапряжения 250 МПа; длина пояска 1 мм). Линия 6 расположена выше при малых значениях коэффициента трения и ниже, чем линия 7 при $f = 0,25$. Линии 5 и 6 (рис. 2, в, з) построены при коэффициентах вытяжки 1,5 и упрочнения 1,37 и 2,0. Линия 6 при $\alpha = 4^\circ$ заметно выше линии 5 при $\alpha = 9^\circ$, когда коэффициент трения равен нулю, а при $f = 0,25$ линия 6 ниже линии 5 (рис. 2, в, з). Следовательно, характер влияния угла α на производную (8) зависит от длины пояска и коэффициента трения. Данные рис. 2 показывают, что увеличение коэффициента k от 0,25 (рис. 2, а) до 2,0

(рис. 2, з) привело к усилению влияния коэффициента трения на производную (9) по причине значительного повышения величины производной при малых значениях коэффициента трения.

Пусть в рабочем конусе нестационарная величина коэффициента трения, а в калибрующем пояске коэффициент трения постоянный и равен f_1 . Тогда на выходе калибрующего пояска интенсивность изменения осевого напряжения от нестационарного коэффициента трения f в рабочем конусе при коэффициенте μ вытяжки оценивается по следующей формуле:

$$\frac{d\sigma_z}{df} = \frac{d_{s_0}(\mu^k - 1) \left(1 - \frac{\sigma_q}{\sigma_{s_0}}\right)}{k \operatorname{tg} \alpha} \left(1 - \frac{2Lf_1}{r_k}\right). \quad (10)$$

Из формулы (10) следует снижение величины производной при росте постоянного коэффициента трения f_1 в пояске и его длины, уменьшении радиуса r_k . Это подтверждают результаты расчета производной (10) в зависимости от напряжения противонапряжения при коэффициентах вытяжки 1,25 и 1,50, коэффициентах трения 0,05 и 0,15 (рис. 3), при $\alpha = 6^\circ$ и $\alpha = 16^\circ$.

Увеличение коэффициента вытяжки и коэффициента упрочнения привело к повышению производной (10). Величина производной (рис. 3) меньше при наличии калибрующего пояска (сплошные линии) и большем значении угла α (линии 5, 6). Таким образом, при постоянной величине коэффициента f_1 в пояске проявляется его стабилизирующее действие на величину силы волочения, что согласуется с результатами работ [18 – 20].

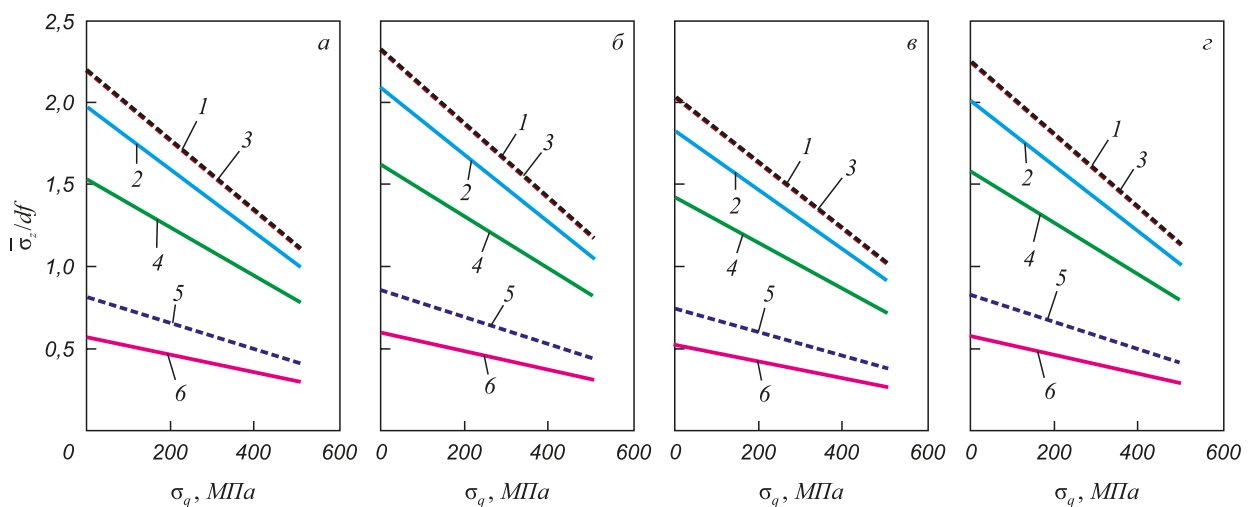


Рис. 3. Зависимость производной $d\bar{\sigma}_z/df$ от напряжения противонапряжения:
а, б – $\mu = 1,25$; в, з – $\mu = 1,5$; а, в – $k = 0,25$; б, з – $k = 0,75$; нечетные номера кривых (штриховые линии) – отсутствует поясок; четные (сплошные линии) – поясок с радиусом и длиной 1 мм; 1 – 4 – $\alpha = 6^\circ$; 5, 6 – $\alpha = 16^\circ$; 1, 2 – $f_1 = 0,05$; 3 – 6 – $f_1 = 0,15$

Fig. 3. Dependence of $d\bar{\sigma}_z/df$ derivative on backward pull stress:
а, б – $\mu = 1,25$; в, з – $\mu = 1,5$; а, в – $k = 0,25$; б, з – $k = 0,75$; odd numbers of curves (dashed lines) – no cylinder; even numbers (solid lines) – cylinder with radius and length of 1 mm; 1 – 4 – $\alpha = 6^\circ$; 5, 6 – $\alpha = 16^\circ$; 1, 2 – $f_1 = 0,05$; 3 – 6 – $f_1 = 0,15$

Заключение о стабилизирующем действии противонапряжения на напряженное состояние круглого сплошного профиля сделано при принятии модели его упрочнения (1) и использовании соответствующих уравнений для расчета составляющих полного осевого напряжения при этой модели. Аналогичные исследования проведены при модели упрочнения:

$$\sigma_s = \sigma_{s_0} + m\varepsilon^n = \sigma_{s_0} + m(\ln \mu)^n, \quad (11)$$

где m, n – эмпирические коэффициенты; $\varepsilon = \ln \mu$ – степень деформации.

Зависимость (11) позволяет представлять более сложные формы кривых упрочнения, чем степенная функция (1), так как включает три постоянных коэффициента, а эмпирическая формула (1) – два. При модели упрочнения (11) уравнение для первой производной напряжения волочения по коэффициенту трения при отсутствии калибрующего пояска также более простое, чем при его наличии:

$$\frac{d\sigma_z}{df} = \frac{\sigma_{s_0} \ln \mu + \frac{m(\ln \mu)^{n+1}}{n+1}}{\operatorname{tg} \alpha} \left(1 - \frac{\sigma_q}{\sigma_{s_0}} \right). \quad (12)$$

Формула (12) и аналогичная зависимость (8) при кривой упрочнения уравнения (1) очевидно показывают снижение величины производной с ростом напряжения противонапряжения σ_q и угла α . Таким образом, при разных моделях упрочнения наблюдается стабилизация напряженного состояния круглого сплошного профиля от применения противонапряжения.

СОПОСТАВЛЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ РАСЧЕТА

С АНАЛОГИЧНЫМИ ДАННЫМИ РАБОТЫ [6]

В заключение сравним значения производной (8) и аналогичной производной из работы [6], использованной при анализе влияния нестабильной величины коэффициента трения на колебание напряжения волочения. Формула для расчета производной [6] при принятых обозначениях параметров деформации имеет следующий вид:

$$\frac{d\sigma_z}{df} = 4\tau_T \left(\frac{\ln \mu}{\sin(2\alpha)} + \frac{L}{r_k} \right), \quad (13)$$

где τ_T – сопротивление деформации при сдвиге.

Производная (13) получена после дифференцирования по коэффициенту трения уравнения для определения напряжения волочения, включающего постоянную величину сопротивления деформации сдвигу τ_T при отсутствии деформационного упрочнения или усредненную величину τ_T в рабочем конусе волок [6]:

$$\sigma_z = 2\tau_T \left[\sqrt{3} \ln \left(\frac{r_0}{r_k} \right) + \frac{2}{3} \operatorname{tg} \alpha + 2f \left(\frac{\ln \mu}{\sin(2\alpha)} + \frac{L}{r_k} \right) \right]. \quad (14)$$

Уравнение (14) предусматривает расчет прироста осевого напряжения в калибрующем пояске по упрощенной зависимости, не учитывающей, в отличие от новой формулы (5), напряженного состояния в пояске:

$$\sigma_{z_4} = 4\tau_T f \left(\frac{L}{r_k} \right). \quad (15)$$

При отсутствии ($k = 0$) деформационного упрочнения формула (8) принимает следующий вид:

$$\frac{d\sigma_z}{df} = \frac{\sigma_{s_0} \ln \mu \left(1 - \frac{\sigma_q}{\sigma_{s_0}} \right)}{\operatorname{tg} \alpha}. \quad (16)$$

Поскольку формула (13) не учитывает противонапряжения, а формула (16) представлена для случая отсутствия калибрующего пояска, то сравнили значения производных (13) и (16) при отсутствии противонапряжения и калибрующего пояска ($\sigma_q = 0$; $L = 0$). Пусть исходный предел σ_{s_0} текучести материала заготовки составляет 1000 МПа. Тогда при отсутствии упрочнения величина сопротивления деформации при сдвиге $\tau_T = \frac{\sigma_{s_0}}{\sqrt{3}} = 577$ МПа. При $\mu = 1,25$ и $\alpha = 6^\circ$ можно определить значения производных по формулам (13) и (16):

$$\begin{aligned} \frac{d\sigma_z}{df} &= 4\tau_T \left(\frac{\ln \mu}{\sin(2\alpha)} \right) = \\ &= 4 \cdot 577 \left(\frac{\ln 1,25}{\sin(2 \cdot 6^\circ)} \right) = 2479 \text{ МПа}; \end{aligned} \quad (17)$$

$$\frac{d\sigma_z}{df} = \frac{\sigma_{s_0} \ln \mu}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{1000 \ln 1,25}{\operatorname{tg} 6^\circ} = 2123 \text{ МПа}. \quad (18)$$

Значения производных, рассчитанные по уравнениям (13) и (16), при $\mu = 1,25$ и $\alpha = 8^\circ$ составили 1870 и 1588 МПа соответственно, а при $\mu = 1,50$ и $\alpha = 8^\circ$ – 3397 и 2885 МПа соответственно. Таким образом, при отсутствии упрочнения, калибрующего пояска и противонапряжения имеем разную зависимость производных, рассчитанных по формулам (13) и (16), от значений коэффициента вытяжки и угла α волочения. Неравенство значений производных (13) и (16) обусловлено различием формул (6) и (14) для расчета напряжения волочения. Необходимо отметить, что в работе [6] определена величина отклонения напряжения волочения $\Delta\sigma_z$ при изменении коэффициента трения на величину Δf по формуле:

$$\Delta\sigma_z = \frac{d\sigma_z}{df} \Delta f. \quad (19)$$

При расчете отклонения по уравнению (19) принята величина $\Delta f = 0,0112$ [6]. Если принять значения производных (17) и (18), то при $\Delta f = 0,0112$ имеем соответствующие значения для отклонения напряжения $\Delta \sigma_z$ 27,8 и 23,8 МПа. Величина Δf зависит от стабильности контактного трения. При высокой величине коэффициента трения и существенной ее нестабильности, например, при $\Delta f = 0,05$, отклонения напряжения волочения $\Delta \sigma_z$ для производных (17) и (18) равны 124 и 106 МПа соответственно.

Выводы

Использование первой производной по коэффициенту трения уравнения, определяющего напряжение волочения, позволяет оценить нестабильность напряженного состояния от изменения величины коэффициента f . Расчетным путем обосновано повышение стабильности напряжения волочения от применения противонапряжения при непостоянной величине коэффициента контактного трения. Нестабильность напряжения волочения от отклонения номинальной величины коэффициента f зависит от значений других параметров деформации. Например, нестабильность от непостоянной величины коэффициента трения усиливается с уменьшением угла волочения. Такой же вывод сделан исследователем М.Я. Бровманом. Установленный характер влияния противонапряжения на стабильность напряженного состояния на основе расчета безразмерной величины производной согласуется с известными данными, полученными при сравнении осевого напряжения при номинальной величине коэффициента трения и ее отклонении в сторону увеличения и уменьшения. Показана зависимость исследуемой величины производной от принятой формулы для ее расчета. Волочение с противонапряжением (как и конструкции инструмента) целесообразно использовать для стабилизации напряженного состояния в очаге деформации проволоки и повышения ее качества. Результаты расчетов показали, что форма очага деформации влияет не только на напряжение волочения [5, 21 – 23], но и на величину его изменения при нестационарном контактном трении.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Колмогоров Г.Л. Гидродинамическая смазка при обработке металлов давлением. – М.: Металлургия, 1986. – 168 с.
2. Radionova L., Radionov A. The current situation and perspectives the development of wire-drawing steel wire // Russian Internet Journal of Industrial. 2013. No. 1. P. 3 – 9.
3. Gur'yanov G.N. Hydrodynamic Friction in the Drawing of Thin Wire // Steel in Translation. 2015. Vol. 45. No. 2. P. 145 – 152.
4. Мор У., Павельски О., Расп В. Оценка технологических смазок для волочения прутков и катанки // Черные металлы. 1987. № 10. С. 16 – 22.

5. Гурьянов Г.Н., Железков О.С. Оценка влияния контактного трения на приrost осевого напряжения в рабочем конусе и калибрующем пояске волоки при волочении стальной проволоки // Изв. вуз. Черная металлургия. 2013. № 1. С. 32 – 35.
6. Бровман М.Я. Анализ точности формул для расчета энергосиловых параметров процесса волочения // Производство проката. 2013. № 9. С. 32 – 34.
7. Бэкофен В. Процессы деформации / Пер. с англ. В.С. Берковского, Ф.И. Рузанова. – М.: Металлургия, 1977. – 288 с.
8. Гурьянов Г.Н. Нестабильность напряженного состояния при волочении проволоки как причина усталостного износа рабочей поверхности волоки // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. № 7. С. 2 – 10.
9. Лысяный И.К., Щёголев Г.А., Лысяная А.Э., Коровина Г.Н. Волоки для волочения проволоки в режиме гидродинамического трения // Метизное производство. Бюл. ин-та «Черметинформация». 1982. Вып. 3. С. 13.
10. А.с. 712158 РФ. Картак Б.Р., Колмогоров В.Л., Бренков А.В. и др. Устройство для волочения проволоки с регулируемым давлением смазки // Открытия, изобретения, промышленные образцы, товарные знаки. 1980. № 4.
11. А.с. 1183224 РФ. Гурьянов Г.Н., Колмогоров В.Л. Белалов Х.Н. и др. Устройство для волочения изделий в режиме гидродинамического трения // Бюл. изобр. 1985. № 37.
12. Zelin M. Microstructure evolution in pearlitic steels during wire drawing // Acta Materialia. 2002. Vol. 50. P. 4431 – 4447.
13. Pilarczyk J.W., Markovsky J. Fem Analysis of effect of die angle on strain and stress state in process of drawing steel for prestressed concrete // Metallurgija. 2005. Vol. 44. No. 3. P. 227 – 230.
14. Rubio E.M., Camacho A.M., Sevilla L., Sebastian M.A. Calculation of the forward tension in drawing processes // Journal of Materials Processing Technology. 2005. No. 162-163. P. 551 – 557.
15. Sy-Wei Lo, Yuung-Hwa Lu. Wire drawing dies with prescribed variations of strain rate // Journal of materials processing technology. 2002. No. 123. P. 212 – 218.
16. Chen Wen-lin, Yao L.U., Peng Li-jing, Liu Qiao-qiu, Yi-hua W.U. Research on Multi-stage Compound Forming Process of Deep Drawing // Journal of Netshape Forming Engineering. 2011. No. 1. P. 23 – 26.
17. Кучеряев Б.В., Николаев Р.А., Жукова Е.А. Расчет энергосиловых параметров процесса волочения прутков // Производство проката. 2006. № 6. С. 30 – 33.
18. Гурьянов Г.Н. Расчет прироста осевого напряжения в калибрующем пояске волоки при волочении круглого сплошного профиля // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. Т. 79. № 5. С. 58 – 60.
19. Yang S.W. Numerical Simulation of Deep Drawing Process of Drawing Cylinder Based on Dynaform // Advanced Materials Research. 2013. Vol. 816-817. P. 294 – 297.
20. Kolmogorov G.L., Chernov T.V., Aver'yanova E.M., Snigireva M.V. Optimal drawplate geometry // Steel in Translation. 2013. Vol. 43. No. 7. P. 432, 433.
21. Wright R.N. Wire Technology Process Engineering and Metallurgy. 2011. – 320 p.
22. Hosford W.F., Caddell R.M. Metal Forming. Mechanics and Metallurgy. – Cambridge University Press. 2007. – 312 p.
23. Wright R.N. Workability in Extrusion and Wire Drawing, in Workability Testing Techniques, G.E. Dieter ed. ASM International, Materials Park, Ohio, 1984. P. 255.

Поступила в редакцию 28 декабря 2016 г.

После доработки 9 сентября 2018 г.

Принята к публикации 6 октября 2018 г.

INCREASE OF WIRE STRESS STABILITY DEPENDING ON ANTI-TENSION ACTION WHEN FRICTION COEFFICIENT IS INCONSTANT

G.N. Gur'yanov¹, O.B. Kalugina²

¹OJSC NIImetiz, Scientific Research Institute of Hardware Industry, Magnitogorsk, Chelyabinsk Region, Russia

²Nosov Magnitogorsk State Technical University, Magnitogorsk, Chelyabinsk Region, Russia

Abstract. The strain parameters instability causes variable axial stress during the drawing process. Contact friction specification varies in the shortest time and depends on many factors: homogeneity physico-mechanical properties of the processed material along the length of the pulled billet, quality of technological lubrication, stability of tension force of the billet at the entrance of deformation center and cooling intensity of the fiber, suction drums, washers, rollers, etc. To estimate the effect of friction coefficient on stability of drawing force (stress), first derivative with respect to friction coefficient in drawing equation is used. The first derivative dependence on drawing coefficient is constructed for different hardening models and deformation parameters. Action of anti-tension was investigated when drawing on stressed state of a circular continuous profile. Studies have been carried out for simulation models of hardening. In the course of study, it was proved that it is possible to estimate instability of stressed state by the first derivative with respect to magnitude, depending on friction coefficient of the equation that determines drawing stress. For different deformation parameters, the first derivative with respect to friction coefficient is calculated for the equation determining axial drawing stress. A decrease in magnitude of the derivative is shown with an increase in anti-tension, which indicates expediency of drawing with anti-tension to stabilize drawing force and to reduce fatigue wear of dies working surface. Calculations were performed for different values of friction coefficient for drawing under the conditions of presence and absence of drawing cylinder and slope angle of drawing cone to drawing axis, mechanical properties of the billet for drawing, and for various coefficients of its hardening. The stabilizing effect of drawing cylinder of dies on drawing stresses with an increased friction coefficient is shown. Instability of drawing stress from deviation of nominal value of friction coefficient depends on values of other strain parameters. In conditions of drawing cylinder presence and small amount of deformation in drawing path and smaller initial friction coefficient, change in its magnitude has a greater effect on stability of the stressed state. Increase in drawing stress stability positively affects quality of wire, operational stability of units and drawing-line elements, for example, due to decrease in fatigue wear of die working surfaces, drawing drums, bypass and straightening rollers. Drawing with anti-tension and the use of special drawing tools stabilize stress state in deformation zone.

Keywords: drawing, wire, anti-tension, axial stress, safety factor, contact friction coefficient intensity of strain hardening, drawing force stabilization, fatigue wear.

DOI: 10.17073/0368-0797-2019-4-315-323

REFERENCES

1. Kolmogorov G.L. *Gidrodinamicheskaya smazka pri obrabotke metallov davleniem* [Hydrodynamic lubrication at metal forming]. Moscow: Metallurgiya, 1986, 168 p. (In Russ.).
2. Radionova L., Radionov A. The current situation and perspectives the development of wire-drawing steel wire. *Russian Internet Journal of Industrial*. 2013, no. 1, pp. 3–9.
3. Gur'yanov G.N. Hydrodynamic friction in the drawing of thin wire. *Steel in Translation*. 2015, vol. 45, no. 2, pp. 145–152.
4. Mor U., Pavel'ski O., Rasp V. Evaluation of technological lubricants for drawing rods and rolled wire. *Chernye metally*. 1987, no. 10, pp. 16–22. (In Russ.).
5. Gur'yanov G.N., Zhelezkov O.S. Assessment of gains contact friction axial stress in the working cone and the caliber of the girdle portages at drawing steel wire. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2013, no. 1, pp. 32–35. (In Russ.).
6. Brovman M.Ya. Analysis of accuracy of formulas for calculating drawing power parameters. *Proizvodstvo prokata*. 2013, no. 9, pp. 32–34. (In Russ.).
7. Backofen W.A. *Deformation Processing*. Addison-Wesley, 1972. (Russ.ed.: Backofen W. *Protseessy deformatsii*. Moscow: Metallurgiya, 1977, 288 p.).
8. Gur'yanov G.N. Instability of stress state during wire drawing as a cause of fatigue wear of die drawing surface. *Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmaxh*. 2015, no. 7, pp. 2–10. (In Russ.).
9. Lysyanyi I.K., Shchegolev G.A., Lysyanaya A.E., Korovina G.N. Dies for wire drawing in hydrodynamic friction mode. *Metiznoe proizvodstvo. Byul. in-ta "Chermetinformatsiya"*. 1982, no. 3, p. 13. (In Russ.).
10. Kartak B.R., Kolmogorov V.L., Bren'kov A.V. etc. Wire drawing device with adjustable lubrication pressure. Certificate of authorship RF no. 712158. *Otkrytiya, izobreteniya, promyshlennye obraztsy, tovarnye znaki*. 1980, no. 4. (In Russ.).
11. Gur'yanov G.N., Kolmogorov V.L., Belalov Kh.N. etc. *Ustroystvo dlya volocheniya izdelii v rezhime gidrodinamicheskogo treniya* [Device for drawing in hydrodynamic friction mode]. Certificate of authorship RF no. 1183224. *Bulleten, izobretenii*. 1985, no. 37, (In Russ.).
12. Zelin M. Microstructure evolution in pearlitic steels during wire drawing. *Acta Materialia*. 2002, vol. 50, pp. 4431–4447.
13. Pilarczyk J.W., Markovsky J. Fem Analysis of effect of die angle on strain and stress state in process of drawing steel for prestressed concrete. *Metallurgiya*. 2005, vol. 44, no. 3, pp. 227–230.
14. Rubio E.M., Camacho A.M., Sevilla L., Sebastian M.A. Calculation of the forward tension in drawing processes. *Journal of Materials Processing Technology*. 2005, no. 162–163, pp. 551–557.
15. Sy-Wei Lo, Yuung-Hwa Lu. Wire drawing dies with prescribed variations of strain rate. *Journal of Materials Processing Technology*. 2002, no. 123, pp. 212–218.
16. Chen Wen-lin, Lu Yao, Peng Li-jing, Liu Qiao-qiu, Wu Yi-hua. Research on multi-stage compound forming process of deep drawing. *Journal of Netshape Forming Engineering*. 2011, no. 1, pp. 23–26.
17. Kucheryaev B.V., Nikolaev R.A., Zhukova E.A. Calculation of the power parameters of rods drawing process. *Proizvodstvo prokata*. 2006, no. 6, pp. 30–33. (In Russ.).
18. Gur'yanov G.N. Calculation of axial stress increase in drawing cylinder of die at round solid profile drawing. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2013, vol. 79, no. 5, pp. 58–60. (In Russ.).
19. Yang S.W. Numerical simulation of deep drawing process of drawing cylinder based on Dynaform. *Advanced Materials Research*. 2013, vol. 816–817, pp. 294–297.
20. Kolmogorov G.L., Chernov T.V., Aver'yanova E.M., Snigireva M.V. Optimal drawplate geometry. *Steel in Translation*. 2013, vol. 43, no. 7, pp. 432, 433.
21. Wright R.N. *Wire Technology Process Engineering and Metallurgy*. 2011, 320 p.
22. Hosford W.F., Caddell R.M. *Metal Forming. Mechanics and Metallurgy*. Cambridge University Press, 2007, 312 p.

23. Wright R.N. *Workability in Extrusion and Wire Drawing, in Workability Testing Techniques*. Dieter G.E. ed. ASM International, Materials Park, Ohio, 1984, pp. 255.

O.B. Kalugina, *Cand. Sci. (Eng.)*, Senior Lecturer of the Chair of Computer Science and Information Security
(kalugina.olga@bk.ru)

Information about the authors:

G.N. Gur'yanov, *Cand. Sci. (Eng.)*, Assist. Professor, Senior Researcher (ggnbelorhome@rambler.ru)

Received December 28, 2016

Revised September 9, 2018

Accepted October 6, 2018
