

УДК 621.778

Г.Н. Гурьянов<sup>1</sup>, О.С. Железков<sup>2</sup>

<sup>1</sup> ООО «Феникс +»

<sup>2</sup> Магнитогорский государственный технический университет

## ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ КОНТАКТНОГО ТРЕНИЯ НА ПРИРОСТ ОСЕВОГО НАПРЯЖЕНИЯ В РАБОЧЕМ КОНУСЕ И КАЛИБРУЮЩЕМ ПОЯСКЕ ВОЛОКИ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ СТАЛЬНОЙ ПРОВОЛОКИ

**Аннотация.** Выполнены расчеты прироста осевого напряжения в калибрующем пояске, полного напряжения волочения и относительного прироста полного напряжения от действия силы контактного трения при разных параметрах деформации проволоочной заготовки.

**Ключевые слова:** волочение, проволока, методика расчета, осевое напряжение, коэффициент трения, затраты энергии на преодоление контактного трения.

## ASSESSMENT OF GAINS CONTACT FRICTION AXIAL STRESS IN THE WORKING CONE AND THE CALIBER OF THE GIRDLE PORTAGES AT DRAWING STEEL WIRE

**Abstract.** Performed calculations rate of the axial stress in the caliber of bands, the total voltage wire drawing and the relative increase in the total voltage of the force of contact friction with different parameters of the workpiece deformation wire.

**Keywords:** drawing, wire, method of calculation, the axial stress and the coefficient of friction, the cost of energy to overcome the contact friction.

Контактное трение при обработке металлов давлением увеличивает работу деформации, снижает стойкость инструмента, ведет к возникновению и усилению неоднородности деформации [1]. Значения прироста осевого напряжения в рабочем конусе и калибрующем пояске волоки, вычисленные по разным методикам, могут существенно отличаться. Поэтому в настоящее время нет однозначного представления о величине затрат энергии на преодоление силы внешнего трения во всем рабочем канале волоки и отдельно в цилиндрическом пояске при холодном волочении проволоки [2 – 5].

Целью работы является показать абсолютную и относительную величину прироста осевого напряжения в калибрующем пояске и на выходе волоки, вызванного силой контактного трения при разных значениях основных параметров деформации круглой сплошной заготовки.

Полное осевое напряжение определяли с учетом четырех составляющих:

$$\sigma_{z\Sigma} = \sigma_{z1} + \sigma_{z2} + \sigma_{zq} + \sigma_{cd},$$

где  $\sigma_{z1}$ ,  $\sigma_{z2}$  – прирост осевого напряжения в рабочем конусе и калибрующем пояске волоки соответственно;  $\sigma_{zq}$ ,  $\sigma_{cd}$  – составляющие от действия напряжения противонапряжения и от дополнительного сдвига металла на входе и выходе из рабочего конуса соответственно. Трение оказывает влияние на величину трех составляющих:  $\sigma_{z1}$ ,  $\sigma_{z2}$ ,  $\sigma_{zq}$ .

Величину предела текучести металла  $\sigma_{si}$  в зависимости от коэффициента вытяжки  $\mu$  представляют степенной зависимостью [4, 5]:

$$\sigma_{si} = \sigma_{s0} \mu^k, \quad (1)$$

где  $\sigma_{s0}$ ,  $\sigma_{si}$  – предел текучести металла на входе и выходе рабочего конуса волоки;  $k$  – коэффициент упрочнения;  $\mu = (r_0/r_k)^2$  – коэффициент вытяжки,  $r_0$ ,  $r_k$  – радиус заготовки до и после деформации. Эмпирическая формула (1) наиболее подходит для описания изменения прочности холоднотянутой углеродистой проволоки из патентованной заготовки при холодном волочении [4].

Расчет основной составляющей полного осевого напряжения – прироста осевого напряжения в рабочем конусе волоки выполнили по формуле [6, 7]:

$$\sigma_{z1} = \sigma_{s0} \int_1^{\mu} \mu^{k-1} (1 + f \operatorname{ctg} \alpha) d\mu, \quad (2)$$

где  $f$  – коэффициент трения;  $\alpha$  – угол наклона образующей рабочего конуса к оси волочения. При расчете  $\sigma_{z1}$  по формуле (2) учитывается непрерывное изменение предела текучести вдоль длины очага деформации согласно зависимости (1).

Расчет прироста осевого напряжения в пояске выполнили по формуле, учитывающей его величину на входе пояска [8]:

$$\sigma_{z2} = 2fl(\sigma_{sk} - \sigma_{zk})/r_k = 2fl(\sigma_{s0}\mu^k - \sigma_{zk})/r_k, \quad (3)$$

где  $l$ ,  $r_k$  – длина и радиус пояска;  $\sigma_{rk}$  – осевое напряжение на входе пояска, определяемое по формуле (6). Разность значений предела текучести и осевого напряжения на входе калибрующего пояска, стоящая в круглых

скобках конечного выражения, определяет величину радиального напряжения в этом месте.

Губкин С.И. [9] предложил формулу для расчета прироста осевого напряжения в калибрующем пояске:

$$\sigma_{z2} = 2\nu\sigma_{sk}fl/r_k,$$

где  $\nu$  – коэффициент, зависящий от условий деформации,  $\nu = 0,1 - 1,0$ . Для простоты расчета прироста напряжения часто принимают  $\nu = 1,0$  [10], тогда

$$\sigma_{z2} = 2\sigma_{sk}fl/r_k. \quad (4)$$

В этом случае расчетная величина прироста завышается. Если же вместо величины  $\sigma_{sk}$  принять среднее значение предела текучести  $\sigma_s$  в очаге деформации [11], то завышение прироста осевого напряжения при использовании  $\sigma_{sk}$  несколько снизится

$$\sigma_{z2} = 2\sigma_s fl/r_k, \quad (5)$$

где  $\sigma_s = (\sigma_{s0} + \sigma_{sk})/2$ .

Прирост напряжения в пояске согласно зависимостям (4) и (5) пропорционален соответственно пределу текучести на входе пояска и среднему его значению в рабочем конусе волоки. В предложенной формуле (3) прирост пропорционален разности значений предела текучести и осевого напряжения или модулю радиального напряжения на входе пояска.

Прирост осевого напряжения от действия противонапряжения и деформации сдвига металла на входе и выходе рабочего конуса волоки определили по известным в теории волочения формулам:

$$\sigma_{zq} = \sigma_q / \mu^{fctg\alpha};$$

$$\sigma_{cd} = 4\sigma_s tg\alpha / (3 \cdot \sqrt{3}),$$

где  $\sigma_q$  – напряжение противонапряжения. Осевое напряжение на входе пояска и полное напряжение волочения определяются соответствующими равенствами:

$$\sigma_{zk} = \sigma_{z1} + \sigma_{zq} + \sigma_{cd};$$

$$\sigma_{z\Sigma} = \sigma_{zk} + \sigma_{z2}.$$

Относительную величину прироста полного осевого напряжения от действия силы контактного трения, % оценивали по формуле

$$\delta = 100(\sigma_{z\Sigma} - \sigma_{z\Sigma 0})/\sigma_{z\Sigma}, \quad (6)$$

где  $\sigma_{z\Sigma}$  – полное напряжение при значениях коэффициента трения 0,005; 0,025; 0,05; 0,10 и 0,15;  $\sigma_{z\Sigma 0}$  – полное напряжение при отсутствии трения.

Расчет выполнили при следующих исходных данных: диаметр и длина калибрующего пояска 2 мм. На-

чальный предел текучести металла  $\sigma_{s0} = 800$  МПа и коэффициент упрочнения  $k = 0,25$  (1).

Линии 1 – 5 рис. 1,  $a - в$  определяют область оптимальных углов, при которых минимально полное напряжение волочения. С ростом коэффициента трения область оптимальных углов смещается вправо, в область более высоких значений угла  $\alpha$ . При отсутствии трения линия 0 не имеет минимума. Прирост осевого напряжения в пояске  $\sigma_{z2}$  по формуле (3) меньше, чем при расчете по известным выражениям (4) и (5). Поэтому полное напряжение  $\sigma_{z\Sigma}$  и относительный прирост  $\delta$  ( $a, z, жс$ ), которые вычислены с учетом прироста напряжения  $\sigma_{z2}$  в пояске по формулам (4) и (5), больше соответствующих параметров, определенных по новой зависимости (3). Особенно это заметно при высоких значениях коэффициента трения 0,10 и 0,15. Кривые для прироста осевого напряжения в пояске ( $z$ ) имеют максимум, так как на входе пояска при определенных значениях угла  $\alpha$  наблюдается минимальное осевое напряжение. Зависимости (4) и (5) не учитывают величину осевого напряжения на выходе рабочего конуса и, в частности, одного из параметров величины деформации – угла волочения  $\alpha$ . Поэтому линии для  $\sigma_{z2}$  прямые ( $d, e$ ) и параллельны оси абсцисс. Значения исследуемых параметров  $\sigma_{z\Sigma}$ ,  $\sigma_{z2}$  и  $\delta$ , вычисленные с применением формул (4) и (5), значительно не отличаются.

Зависимости на рис. 2 для относительного прироста полного напряжения волочения  $\delta$  от действия контактного трения даны при коэффициенте вытяжки 1,15 ( $a - в$ ) и 1,25 ( $z - e$ ). Для построения всех графиков использована формула (3), а формула (4) только для зависимостей ( $б$ ). Снижение прироста  $\delta$  от действия противонапряжения при коэффициенте вытяжки 1,15 и длине пояска 2 мм показывает сравнение кривых ( $a$ ) и ( $в$ ), а при коэффициенте вытяжки 1,25 и отсутствии пояска – сравнение кривых ( $d$ ) и ( $e$ ). Рост обжатия заготовки также снижает прирост  $\delta$ . Это видно, например, при анализе кривых рис. 2,  $a$  и рис. 1,  $жс$ , построенных при отсутствии противонапряжения и длине пояска 2 мм, а также кривых рис. 2,  $в$  и рис. 2,  $z$  при действии противонапряжения. Линии зависимостей рис. 2,  $e$  находятся ниже соответствующих линий других графиков рис. 2 и рис. 1,  $жс$ , так как первые построены при действии противонапряжения, отсутствии пояска и большем значении коэффициента вытяжки 1,25. С ростом угла волочения  $\alpha$  снижается значимость влияния величины коэффициента трения на прирост  $\delta$ , так как все кривые сходятся.

При волочении стальной проволоки величина угла  $\alpha$  находится в пределах от 4 – 10°. Примем распространенные для практики холодного волочения стальной проволоки значения коэффициента трения в интервале 0,025 – 0,10 [3, 12]. Пусть длина пояска равна 1 мм, противонапряжение отсутствует, а угол  $\alpha = 6^\circ$ . При коэффициенте вытяжки 1,15 (единичном обжатии 13,0 %) и коэффициенте трения 0,025 и 0,10 относительный прирост  $\delta$  соответственно равен 24,5 и 54,6 %. Значе-

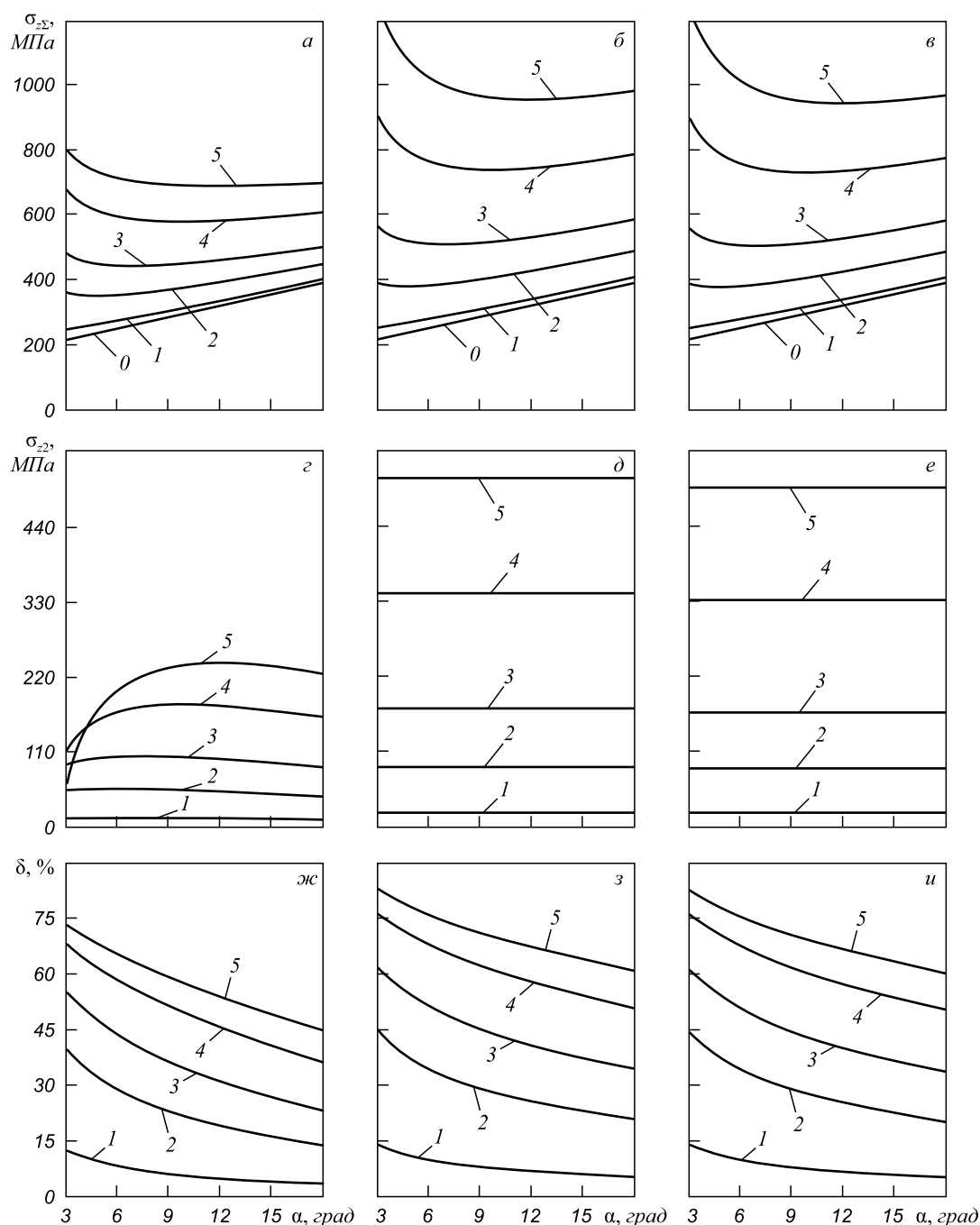


Рис. 1. Зависимость полного напряжения волочения (*a* – *в*), прироста осевого напряжения в пояске  $\sigma_{z2z}$  (*з* – *е*) и относительного прироста полного напряжения  $\delta$  (*ж* – *и*) от действия контактного трения при отсутствии противонапряжения и коэффициенте вытяжки 1,25 в зависимости от угла волочения  $\alpha$ :

*a*, *з*, *ж* – расчет с использованием формулы (3); *б*, *д*, *з* – формулы (4); *в*, *е*, *и* – формулы (5);  
 $0 - f = 0$ ;  $1 - f = 0,005$ ;  $2 - f = 0,025$ ;  $3 - f = 0,05$ ;  $4 - f = 0,10$ ;  $5 - f = 0,15$

ние прироста  $\delta$  равно 20,4 и 47,7 % при коэффициенте вытяжки 1,4 (единичном обжатии 28,6 %) и коэффициенте трения 0,025 и 0,10 соответственно. Пусть приложено напряжение противонапряжения 200 МПа, что составляет 25 % исходного предела текучести, равного 800 МПа. Тогда при  $f = 0,025$  и 0,10 и коэффициенте вытяжки 1,15 прирост  $\delta = 9,9$  и 29,2 %, а при  $\mu = 1,4$  имеем  $\delta = 10,6$  и 29,9 %. Рост напряжения противонапряжения снижает прирост осевого напряжения в пояске соглас-

но формуле (3) и повышает полное напряжение, что уменьшает относительный прирост (6), особенно при малом коэффициенте вытяжки. Поэтому при коэффициенте вытяжки 1,15 величина  $\delta$  снизилась в большей мере от действия противонапряжения, чем при коэффициенте вытяжки 1,4.

Расчеты показали, что при отсутствии противонапряжения значения исходного предела текучести  $\sigma_{s0}$  и коэффициента упрочнения  $k$  не влияют на относитель-

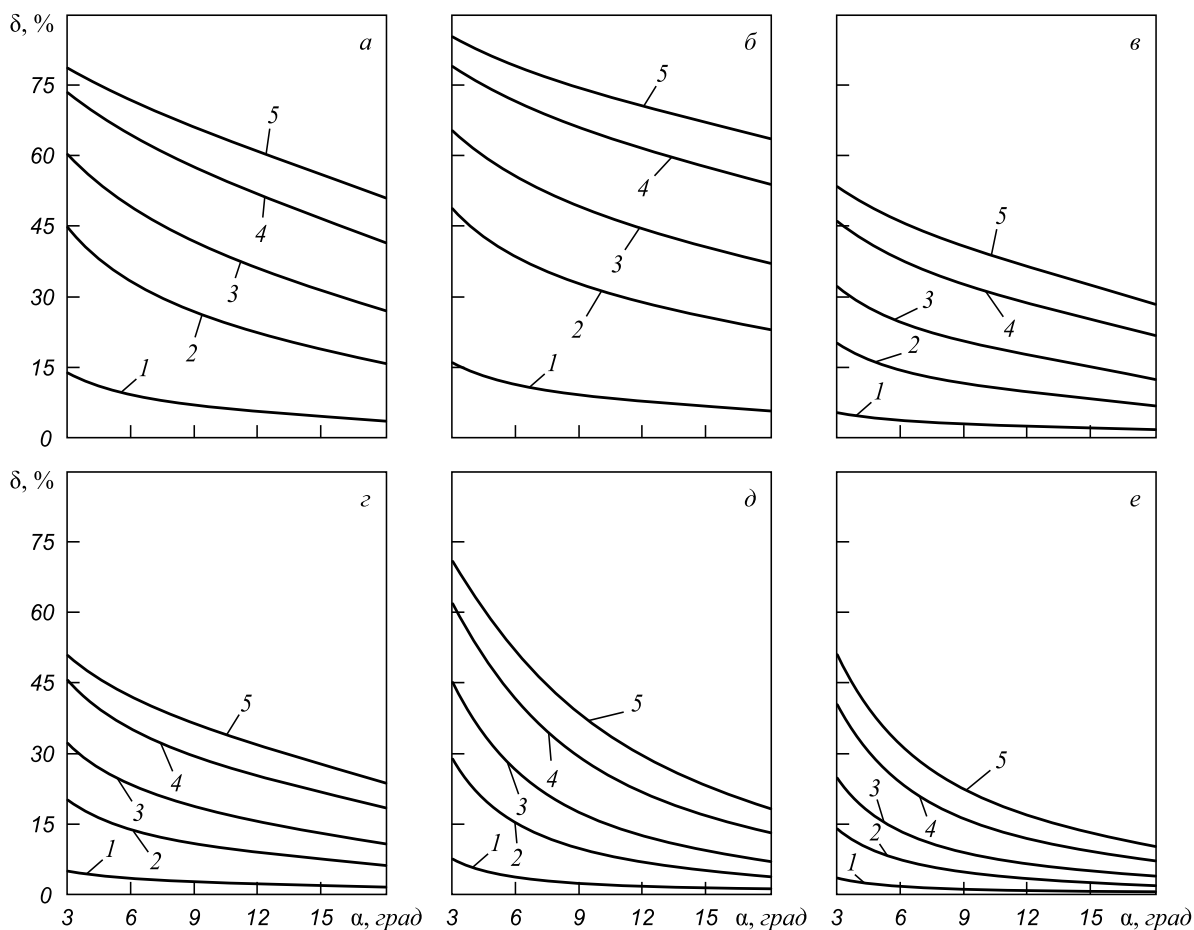


Рис. 2. Зависимость относительного прироста полного напряжения  $\delta$  от действия контактного трения от угла волочения  $\alpha$ :  $a - \nu$  – коэффициент вытяжки 1,15;  $z - e$  – коэффициент вытяжки 1,25;  $a, б, д$  – нет противонапряжения;  $в, z, e$  – напряжение противонапряжения 200 МПа;  $д, e$  – нет пояска;  $a - z$  – длина пояска 2 мм;  $б$  – расчет с применением формулы (4); остальные обозначения на рис. 1

ный прирост  $\delta$  при заданном характере упрочнения (1) и принятых формулах для определения составляющих полного напряжения  $\sigma_{z1}$ ,  $\sigma_{z2}$ ,  $\sigma_{zq}$  и  $\sigma_{cd}$ . Относительный прирост  $\delta$  позволяет оценить долю потерь энергии на преодоление напряжений контактного трения в рабочем конусе и калибрующем пояске волоки. Увеличение обжатия заготовки, угла волочения и напряжения противонапряжения снижают показатель  $\delta$ . Однако это не всегда приводит к повышению эффективности деформирования по причине роста усилия протяжки в проходе маршрута волочения и частоты разрушения обрабатываемого металла. Улучшение же условия контактного трения позволяет одновременно уменьшить прирост  $\delta$  и силу волочения.

**Выводы.** Величина прироста осевого напряжения в пояске по формуле (3) ниже, чем по формулам (4) и (5). Формула (3) учитывает величину осевого напряжения и предела текучести на входе калибрующего пояска, а, следовательно, основные параметры деформации проволочной заготовки: угол волочения  $\alpha$ , напряжение противонапряжения, длину пояска, коэффициенты вытяжки, трения и упрочнения. Линия зависимости прироста осевого напряжения от угла волочения по формуле (3) имеет максимум. В целом величина относительного

прироста осевого напряжения в рабочем канале волоки  $\delta$ , вызванного силой контактного трения, при общепринятых значениях параметров волочения стальной проволоки составляет 10 – 55 %. Наибольшее влияние на относительный прирост осевого напряжения от действия контактного трения оказывают значения коэффициентов трения и вытяжки, угла рабочего конуса волоки и напряжения противонапряжения. Значения исходного предела текучести и коэффициента упрочнения существенно влияют на величину абсолютного прироста осевого напряжения в пояске, но в значительно меньшей степени сказываются на относительной величине общего прироста осевого напряжения  $\delta$ . Для выполнения уточненных расчетов осевого напряжения волочения при повышенных значениях коэффициентов трения ( $f > 0,05$ ), вытяжки ( $\mu > 1,25$ ) и напряжения противонапряжения ( $\sigma_q > 0,15\sigma_{s0}$ ) вместо формул (4) и (5) можно рекомендовать зависимость (3).

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. – М: Высшая школа, 1963. – 389 с.
2. Тарнавский А.Л. Эффективность волочения с противонапряжением. – М.: Металлургия, 1959. – 152 с.

3. Перлин И.Л., Ерманок М.З. Теория волочения. – М.: Металлургия, 1971. – 447 с.
4. Кулеша В.А., Клековкина Н.А., Белалов Х.Н. Изготовление высококачественных метизов (научный и практический опыт Белорецкого металлургического комбината). – Магнитогорск: Магнитогорский дом печати, 1999. – 327 с.
5. Гурьянов Г.Н. Расчет, анализ напряжений, деформаций и запаса прочности при холодном волочении проволоки: Монография. – Магнитогорск: МГТУ, 2008. – 358 с.
6. Гурьянов Г.Н. // Заготовительные производства в машиностроении. 2011. № 7. С. 35 – 40.
7. Гурьянов Г.Н. Методика и результаты расчета прироста осевого напряжения при изменении вдоль рабочего канала проволоки параметров деформации проволоки // Обработка сплошных и слоистых материалов: Межвуз. сб. науч. тр. / Под ред. М.В. Чукина. – Магнитогорск: МГТУ, 2011. Вып. 37. С. 72 – 78.
8. Гурьянов Г.Н. // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. № 6. С. 32 – 35.
9. Губкин С.И. Пластическая деформация металлов. Т. 3. – М.: Металлургиздат, 1960. – 306 с.
10. Зыков Ю.С. // Сталь. 1998. № 4. С. 54 – 55.
11. Осадчий В.Я., Воронцов А.Л. // Производство проката. 2001. № 6. С. 3 – 8.
12. Мор У., Павелски О., Расп В. // Черные металлы. 1987. С. 16 – 22.

© 2013 г. Г.Н. Гурьянов, О.С. Железков  
Поступила 12 ноября 2012 г.