

одновременном увеличении износа колодки в 2,0 раза. Полученные результаты позволяют рекомендовать плазменную закалку и фосфатирование для увеличения износостойкости эластомерного аппарата АПЭ-95.

Выводы. Скорость охлаждения при плазменной закалке тонкой пластины толщиной 4 мм из стали марки 45 составляет 49,93 °С/с (область перлитного превращения) и 10,83 °С/с (область мартенситного превращения), что обеспечивает увеличение твердости до HV 330 – 386. Увеличение скорости охлаждения за счет водяного охлаждения и увеличения толщины образца до 27 мм дало более чем двукратное увеличение твердости – до HV 700 – 800. При этом на месте перекрытия полос (двойной закалки) микротвердость возрастает до HV 800 – 900, а в зоне термического влияния второй на первую полосы – снижается за счет отпускных процессов до HV 600. Испытания на машине трения показало, что фосфатирование колодки снижает износ диска стали марки 30ХГСН2А при твердости HV 350 на этапе приработки (в 8,9 раза), увеличивая

(в 1,2 раза) его на последующих этапах. Плазменная закалка диска в сочетании с фосфатированием колодки снижает износ диска и в ходе приработки (в 11,4 раза), и на последующих этапах (в 9,0 раз) при относительно небольшом ускорении износа фосфатированной колодки в 1,3 и 2,0 раза соответственно.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Линник В.А., Онегина А.К., Андреев А.И. и др. // МиТОМ. 1983. № 4. С. 2 – 4.
2. Лещинский Л.К., Пирч И.И., Самотугин С.С. и др. // Черная металлургия: Бюллетень НТИ. 1988. № 16. С. 2 – 14.
3. Коротков В.А., Баскаков Л.В., Толстов И.А., Бердников А.А. // Сварочное производство. 1991. № 3. С. 31 – 33.
4. Коротков В.А. // Трение и износ. 2011. № 3. С. 23 – 29.
5. Коротков В.А. // Тяжелое машиностроение. 2012. № 1. С. 2 – 5.
6. Сварка в машиностроении: Справочник в 4-х т. Т. 1. / Под ред. Н.А. Ольшанского. – М.: Машиностроение, 1978. – 504 с.

© 2013 г. В.А. Коротков
Поступила 6 августа 2012 г.

УДК 621.778

Г.Н. Гурьянов, В.Н. Ярёмко

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

ИЗМЕНЕНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ПРОВОЛОЧНОЙ ЗАГОТОВКИ ВДОЛЬ РАБОЧЕГО КАНАЛА ВОЛОКИ

Аннотация. Показан характер распределения осевого, радиального напряжений и показателя напряженного состояния по В.Л. Колмогорову вдоль длины рабочего конуса и калибрующего пояска волокна при разных значениях коэффициентов внешнего трения, деформационного упрочнения металла и напряжения противонапряжения. Расчет прироста осевого напряжения в пояске выполнен по известной и предложенной формулам.

Ключевые слова: напряженное состояние, деформационное упрочнение металла, волочение проволоки.

CHANGE OF THE STRESSED STATE OF WIRE STOCK ALONG THE WIRE WORKING CHANNEL OF THE DRAWING DIE

Abstract. The distribution character of the axial stress and the value of the stressed state according to V.L. Kolmogorov along the length of a working cone and the parallel land at different coefficients values of an external friction, metal strain hardening and back pull stress are shown. The calculation of an axial stress in the parallel land is done in accordance with well-known formulas.

Keywords: stressed state, hardening of the metal, wire drawing.

При расчете напряженного состояния в рабочем конусе волокна используется усредненная величина предела текучести как средняя арифметическая его значений на входе σ_{T0} и выходе σ_{TK} очага пластической деформации. В этом случае принимается, что обрабатываемый металл проявляет свойства жесткопластического тела с пределом текучести $\sigma_T = (\sigma_{T0} + \sigma_{TK})/2$, а это снижает достоверность определения закономерностей распределения напряжений вдоль очага пластической деформации. Кроме того, при расчете конечного осевого напряжения

часто не учитывается его прирост в калибрующем пояске и на осуществление сдвиговой деформации металла на входе и выходе рабочего конуса. Расчет прироста осевого напряжения в пояске выполняется по полуэмпирическим формулам, не учитывающим напряженное состояние металла на входе пояска [1, 2].

Покажем характер изменения осевых, радиальных напряжений и показателя напряженного состояния вдоль длины рабочего конуса и калибрующего пояска при разных значениях основных параметров деформации. При

этом выполним расчет прироста осевого напряжения в калибрующем пояске по разным формулам без учета и с учетом осевого напряжения на входе пояска.

При холодном волочении просто и с достаточной для практики точностью описывается изменение предела текучести стальной проволоки (σ_{Ti}) с ростом коэффициента вытяжки $\mu = r_0^2 / r_k^2$ (рис. 1) степенной зависимостью [3]:

$$\sigma_{Ti} = \sigma_{T0} \mu^k, \quad (1)$$

где k – коэффициент упрочнения.

При степенной зависимости (1) расчет прироста осевого напряжения в рабочем конусе волоки удобно выполнять по формуле [4, 5]

$$\sigma_{z1} = \frac{\sigma_{T0}}{k} (\mu^k - 1) (1 + f \operatorname{ctg} \alpha), \quad (2)$$

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

Выражение (2) позволяет учитывать при расчете напряженного состояния изменение предела текучести металла вдоль очага пластической деформации в соответствии с зависимостью (1).

Приняли допущение, что для металла в калибрующем пояске выполняется условие пластичности. В работах [4, 6] калибрующий поясок рассматривается в виде усеченного конуса с бесконечно малым углом α^* и там же получены выражения, позволяющие использовать уравнения разных исследователей для определения прироста осевого напряжения в рабочем конусе при расчете осевого напряжения в пояске (рис. 1). Формула (2) с учетом полученных выражений [4, 6] и характера упрочнения (1) для расчета прироста осевого напряжения в пояске длиной l_p преобразована к виду

$$\sigma_{z21} = \frac{\sigma_{T0} \mu^k}{k} ((\mu^*)^k - 1) (1 + f \operatorname{ctg} \alpha^*); \quad (3)$$

$$\sigma_{z22} = \frac{\sigma_{T0} \mu^k - \sigma_{zk}}{k} ((\mu^*)^k - 1) (1 + f \operatorname{ctg} \alpha^*), \quad (4)$$

где используются следующие соотношения и величины: $h = l_p \operatorname{tg} \alpha^*$; $\mu^* = 1 + 2(h/r_k) + (h/r_k)^2 = [(r_k + l_p \operatorname{tg} \alpha^*)/r_k]^2$,

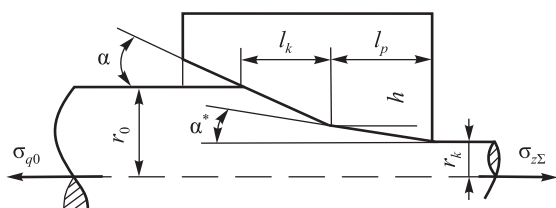


Рис. 1. Схема волочения круглого профиля:

$\sigma_{z\Sigma}$ – полное напряжение волочения; σ_{q0} – напряжение противонапряжения; α^* – бесконечно малый угол наклона образующей поверхности калибрующего пояска; l_k и l_p – длина соответственно очага пластической деформации и пояска

в которых r_k – радиус пояска; $\alpha^* = 10^{-8} - 10^{-6}$ рад и μ^* – бесконечно малые значения угла наклона образующей боковой поверхности пояска и вытяжки в пояске.

Длину пояска варьировали от нуля до 1 мм. Зависимость (3) не учитывает влияние напряженного состояния на выходе рабочего конуса на прирост осевого напряжения в пояске, формула (4) это учитывает через величину осевого напряжения σ_{zk} на входе пояска.

После преобразований и упрощений формулы (3) и (4) приводятся к соответствующим выражениям:

$$\sigma_{z21} = 2\sigma_{TK} f l_p / r_k; \quad (5)$$

$$\sigma_{z22} = (\sigma_{T0} \mu^k - \sigma_{zk}) f l_p / r_k. \quad (6)$$

При выводе формул (5) и (6) заменили функцию $\operatorname{tg} \alpha^*$ малым углом α^* , а слагаемые, полученные после подстановки выражения для вытяжки μ^* в исходные уравнения (3) и (4) и содержащие малые значения α^* и $(\alpha^*)^2$, приравнены к нулю. В зависимости (5) прирост напряжения пропорционален пределу текучести на входе пояска, а в зависимости (6) – разности значений предела текучести и осевого напряжения.

Для сравнения выражений (5) и (6) следует привести формулу С.И. Губкина [1]:

$$\sigma_{z2} = 2\nu \sigma_{TK} f l / r_k, \quad (7)$$

в которой l – длина пояска; $\nu = 0,1 - 1,0$ – эмпирический коэффициент, зависящий от условий деформации.

Для простоты расчета прироста напряжения часто принимают $\nu = 1,0$ [7]. Таким образом, выражение (3) и его упрощенная форма (5) дают близкие результаты расчета прироста осевого напряжения в калибрующем пояске волоки, что и формула С.И. Губкина при $\nu = 1$. Различные формы уравнений (3) и (4), (5) и (6) обусловили необходимость проведения сравнения значений для прироста осевого напряжения в пояске, вычисленным по этим выражениям.

Прирост напряжения σ_{zq} от действия противонапряжения и прирост σ_{cd} , идущий на осуществление деформации сдвига металла на входе и выходе рабочего конуса волоки, рассчитывали по известным в теории волочения формулам:

$$\sigma_{zq} = \sigma_{q0} / \mu^{(f \operatorname{ctg} \alpha)};$$

$$\sigma_{cd} = 4\sigma_1 \operatorname{tg} \alpha / (3\sqrt{3}),$$

где σ_{q0} – напряжение противонапряжения.

Полное (суммарное) осевое напряжение на выходе волоки определится выражением

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

Значения осевого и радиального напряжений на выходе рабочего конуса рассчитывали без учета сдвиговой

деформации. Напряжения на входе калибрующего пояска вычислили без учета и с учетом прироста параметра σ_{cd} . Изменение напряженного состояния вдоль длины калибрующего пояска оценивали, используя формулы (3) и (4). Таким образом, выполнили четыре варианта расчета прироста осевого напряжения в пояске:

1 и 2 – без учета прироста σ_{cd} и с его учетом, расчет реализован по формуле (3);

3 и 4 – без учета прироста σ_{cd} и с его учетом, расчет по формуле (4).

Радиальное напряжение в конусе и калибрующем пояске вычисляли из упрощенного уравнения пластичности:

$$\sigma_{zi} - \sigma_{ri} = \sigma_{ti},$$

где σ_{zi} , σ_{ri} и σ_{ti} – текущие значения осевого, радиального напряжений и предела текучести.

Для пояска предел текучести постоянный и рассчитывается как

$$\sigma_{тк} = \sigma_{т0} \mu^k.$$

Показатель напряженного состояния определяли по В.Л. Колмогорову [8]:

$$k_{\sigma} = \sigma/T,$$

где σ – среднее нормальное напряжение; T – интенсивность касательных напряжений.

При отсутствии противонапряжения на входе в пластический очаг деформации показатель $k_{\sigma} = -1,15$. В случае равенства текущих значений осевого напряжения и предела текучести, когда радиальное напряжение равно нулю и $k_{\sigma} = 0,58$ [9], может наступить разрушение заготовки или при достаточной пластичности обрабатываемой заготовки образование задней внеконтактной деформации, что вызывает неравномерность размера поперечного сечения по длине проволоки.

Расчет выполнили при следующих исходных данных: $\sigma_{т0} = 1000$ МПа, $f = 0,05$ и $f = 0,20$. Значения коэффициента упрочнения определены по уравнению (1): $k_1 = 0,25$ и $k_2 = 0,75$. Волочение осуществляется при отсутствии противонапряжения и напряжении противонапряжения 200 МПа (20 % от исходного предела текучести $\sigma_{т0}$).

Диаметр проволоки на выходе волоки составляет 2 мм, угол наклона образующей рабочего конуса волоки относительно оси волочения принят $\alpha = 6^\circ$. Длина очага пластической деформации l_k равна 1 мм (рис. 1). При заданных значениях α и l_k коэффициент вытяжки на выходе рабочего конуса равен 1,25, а относительное

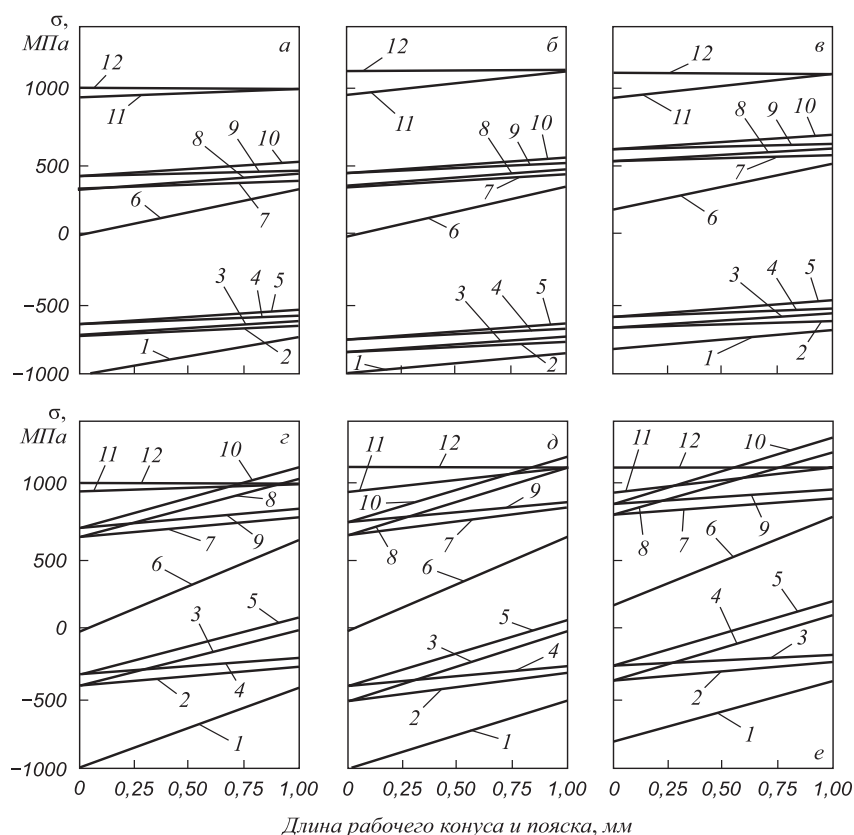


Рис. 2. Изменение осевых и радиальных напряжений вдоль оси рабочего канала при $f = 0,05$ (а – в) и $f = 0,20$ (z – e):

а, z – $k = 0,25$, $\sigma_{g0} = 0$; б, d – $k = 0,75$, $\sigma_{g0} = 0$; в, e – $k = 0,75$, $\sigma_{g0} = 200$ МПа; 1 – радиальное напряжение в конусе; 2 – 5 – радиальное напряжение в пояске (2, 3 – без учета σ_{cd} ; 4, 5 – с учетом σ_{cd}); 6 – осевое напряжение в конусе; 7 – 10 – осевое напряжение в пояске (7, 8 – без учета σ_{cd} ; 9, 10 – с учетом σ_{cd}); 11 и 12 – предел текучести в конусе и в пояске; 2, 4, 7, 9 – с использованием формулы (4); 3, 5, 8, 10 – формулы (3)

обжатие $q = 25\%$. Длина калибрующего пояска l_p также равна 1 мм. Поэтому зависимости напряжений (рис. 2) и показателя напряженного состояния (рис. 3) построены с использованием одной шкалы на оси абсцисс для продольного размера конуса и пояска. На оси ординат рис. 3 значения показателя напряженного состояния ограничены значениями $-1,15$ и $0,58$.

Графики для осевого и радиального напряжений при $f = 0,20$ наклонены к оси абсцисс под более высоким углом, причем угол наклона выше у линий, отражающих напряжения в рабочем конусе. Таким образом, напряжения более интенсивно изменяются вдоль длины рабочего конуса при более высоком коэффициенте трения (рис. 2). С ростом последнего увеличилось расстояние между всеми зависимостями. Кривые 3 и 5, 8 и 10, полученные с использованием формулы (3), параллельны. Пары линий 2 и 7, 4 и 9, построенные на основе более сложной зависимости (4), также параллельны, но пары кривых 2 и 4, 7 и 9 не параллельны. Если не учитывать прирост σ_{cd} осевого напряжения от деформации сдвига, то ордината конца кривой 1 для радиального напряжения в конусе совпадает с ординатами начала аналогичных линий 2 и 3 для пояска. То же самое можно отметить для зависимостей 6, 7 и 8 для осевого напряжения в конусе и пояске. Разница ординат в начале пояска линий 2, 3 и 4, 5 для радиального напряжения и линий 7, 8 и 9, 10 для осевого напряже-

ния равна приросту σ_{cd} . При $f = 0,05$ все графики для осевого напряжения не пересекают линии 11 и 12 для предела текучести, а радиальное напряжение меньше нуля. При $f = 0,20$ линии 8 и 10 для осевого напряжения в пояске, построенные на основе упрощенной формулы (3), при определенных значениях длины пояска находятся выше зависимостей для предела текучести. Это связано с тем, что значения прироста напряжения, рассчитанными по формуле (3), завышены в сравнении со значениями, рассчитанными по уравнению (4), так как формула (3) не учитывает снижения интенсивности прироста осевого напряжения в пояске при его росте. Для этого случая ($f = 0,20$) некоторые части линий 3 и 5 для радиального напряжения лежат выше нулевой отметки на оси ординат. Абсциссы точек пересечения линий 8 и 10 с прямой 12, линий 3 и 5 с нулевой ординатой определяют расстояние от начала калибрующего пояска до поперечного сечения, в котором выполняется условие предельного волочения (осевое напряжение равно пределу текучести). Четыре абсциссы определены на основе формулы (3) без учета и с учетом прироста напряжения σ_{cd} . Приложение противонапряжения привело к уменьшению абсцисс точек пересечения указанных линий, т.е. при меньшем расстоянии находится сечение, в котором наступает равенство осевого напряжения и предела текучести. Если же при расчете использовать зависимость (4), то осевое напряжение меньше преде-

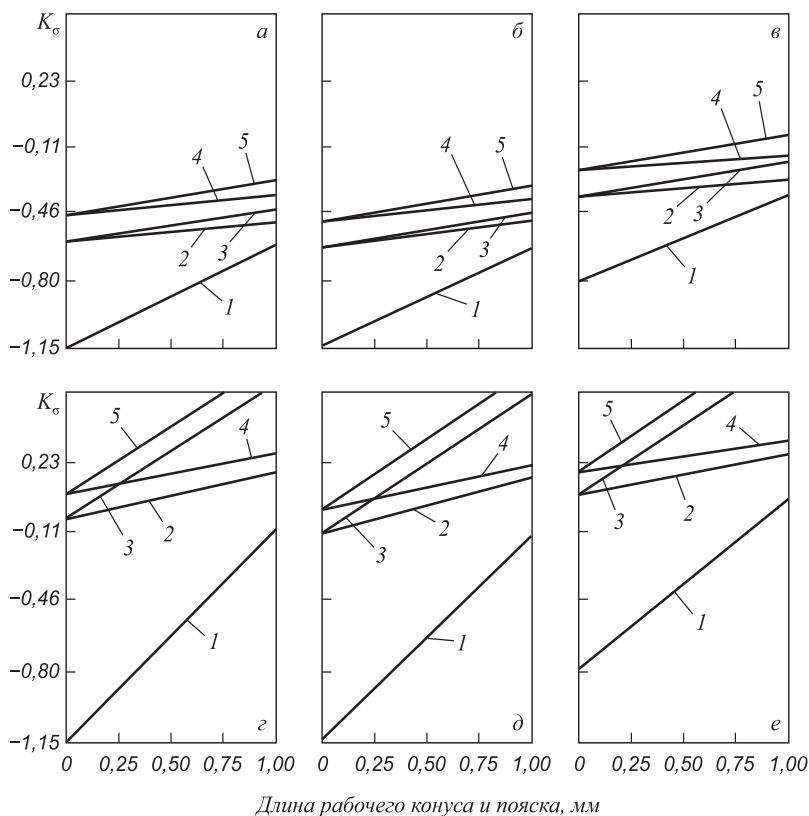


Рис. 3. Изменение показателя напряженного состояния вдоль оси рабочего канала при $f = 0,05$ (а – в) и $f = 0,20$ (г – е):
 а, г – $k = 0,25$; $\sigma_{q0} = 0$; б, д – $k = 0,75$; $\sigma_{q0} = 0$; в, е – $k = 0,75$; $\sigma_{q0} = 200$ МПа; 1 – показатель k_σ в конусе; 2 – 5 – в пояске (2, 3 – без учета σ_{cd} ; 4, 5 – с учетом σ_{cd}); 2, 4 – с использованием формулы (4); 3, 5 – формулы (3)

ла текучести в рабочем конусе и пояске при действии противонапряжения.

С ростом коэффициента упрочнения радиальные напряжения более стабильны по величине, а осевые напряжения интенсивнее возрастают в направлении волочения. При большем коэффициенте упрочнения ($k = 0,75$) линии осевого σ и радиального σ_r напряжений в конусе заметно расходятся с ростом деформации из-за более интенсивного упрочнения.

Расположение линий для показателя напряженного состояния (рис. 3) и для напряжений (рис. 2) имеет одинаковый характер по ряду признаков. Например, расстояние между линиями для K_σ и угол их наклона также меньше при коэффициенте трения 0,05. Приложение противонапряжения привело к смещению линий для σ и K_σ вверх вдоль оси ординат. Точки пересечения зависимостей 3 и 5 и ординаты 0,58 рис. 3 имеют одинаковые абсциссы, как и соответствующие абсциссы пересечения линий 8 и 10 с прямой 12 (рис. 2). Пары линий 2 и 3, 4 и 5 рис. 3, как и пары линий 2 и 3, 4 и 5, 7 и 8, 9 и 10 рис. 2, расходятся с увеличением длины пояска, а рост коэффициента трения усиливает расхождение линий в каждой паре. Это указывает на усиление различия значений прироста осевого напряжения в пояске по формулам (3) и (4) с увеличением длины пояска и коэффициента трения. Расчеты прироста осевого напряжения в пояске при разных значениях коэффициента единичной вытяжки показали, что повышение деформации в процессе волочения также усиливает различие прироста.

Расстояние в вертикальном направлении между линиями осевого напряжения и предела текучести, между линиями показателя напряженного состояния и его предельного значения 0,58 для конуса и пояска характеризует запас прочности деформируемого металла в соответствующей зоне волокна, который определяет стабильность и надежность волочения без микро- и макроразрушения металла заготовки. Запас прочности непрерывно уменьшается в направлении волочения более интенсивно в рабочем конусе при коэффициентах упрочнения 0,25 и трения 0,20. Противонапряжение уменьшило запас прочности. Это следует из сравнения расположения соответствующих линий на рис. 2, б, д и рис. 2, в, е, рис. 3, б, д и рис. 3, в, е.

Принятое допущение об одинаковом нахождении металла в пластическом состоянии в рабочем конусе и калибрующем пояске обеспечивает непрерывность изменения осевого, радиального напряжений и показателя напряженного состояния вдоль оси рабочего конуса и калибрующего пояска волокна, если не учитывается изменение напряженного состояния от деформации сдвига металла на входе и выходе очага рабочего конуса волокна. Но при этом на границе конуса и пояска происходит изменение наклона линий для характеристик напряженного состояния. Это объясняется использованием различных уравнений для расчета напряжений на этих участках волокна. Влияние прироста σ_{cd}

на полное осевое напряжение учли суммированием его величины для металла в сечении, находящемся в начале калибрующего пояска. Поэтому линии графиков при учете σ_{cd} на рис. 2 и рис. 3 имеют разрыв на границе раздела рабочего конуса и пояска.

В заключение следует отметить, что значения прироста осевого напряжения, полученные по двум парам формул (3) и (5), (4) и (6), существенно не отличаются. Поэтому более простые зависимости (5) и (6) имеют преимущество при инженерных расчетах, чем соответствующие им исходные уравнения (3) и (4).

Выводы. Интенсивность изменения напряженного состояния вдоль длины рабочего конуса существенно выше, чем вдоль калибрующего пояска, и усиливается с ростом коэффициента трения и снижением интенсивности деформационного упрочнения. Увеличение коэффициента упрочнения приводит к уменьшению показателя напряженного состояния, что оказывает благоприятное влияние на деформируемость проволоочной заготовки. Противонапряжение действует в обратном направлении – повышает показатель напряженного состояния. При учете прироста осевого напряжения от деформации сдвига металла нарушается монотонность изменения напряжений и показателя напряженного состояния вдоль длины рабочего канала волокна. Разница значений прироста осевого напряжения, рассчитанных по формулам (3) и (4), возрастает с увеличением длины пояска, коэффициентов вытяжки и трения. Формулы (4) и (6) учитывают влияние осевого напряжения на входе калибрующего пояска на его прирост в пояске, поэтому их можно рекомендовать при уточненных расчетах напряженного состояния металла на выходе волокна, особенно при повышенных единичных обжатиях (коэффициент вытяжки более 1,20).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Губкин С.И. Пластическая деформация металлов. Т. 3. – М.: Металлургиздат, 1960. – 306 с.
2. Перлин И.Л., Ерманок М.З. Теория волочения. – М.: Металлургия, 1971. – 447 с.
3. Кулеша В.А., Клековкина Н.А., Белалов Х.Н. Изготовление высококачественных метизов (научный и практический опыт Белоречского металлургического комбината). – Магнитогорск: Магнитогорский дом печати, 1999. – 327 с.
4. Гурьянов Г.Н. Расчет, анализ напряжений, деформаций и запаса прочности при холодном волочении проволоки. – Магнитогорск: изд. ГОУ ВПО «МГТУ», 2008. – 358 с.
5. Гурьянов Г.Н. // Заводская лаборатория. 2008. № 9. С. 61 – 63.
6. Гурьянов Г.Н. // Сталь. 2007. № 1. С. 62 – 64.
7. Зыков Ю.С. // Сталь. 1998. № 4. С. 54, 55.
8. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением: Учебник для вузов. 2-е изд., перераб. и доп. – Екатеринбург: изд. УГТУ – УПИ, 2001. – 836 с.
9. Богатов А.А., Мижирицкий О.И., Смирнов С.В. Ресурс пластичности металлов при обработке металлов давлением. – М.: Металлургия, 1984. – 144 с.