

*Г.Н. Гурьянов, В.Н. Ярёмко*

Магнитогорский государственный технический университет им. Г.И. Носова

## ОЦЕНКА НЕРАВНОМЕРНОСТИ ДЕФОРМАЦИИ ПРОВОЛОЧНОЙ ЗАГОТОВКИ В ПОПЕРЕЧНОМ СЕЧЕНИИ

Неоднородность физико-механических свойств в поперечном сечении холоднотянутой проволоки может быть вызвана многими технологическими факторами волочильного производства и особым характером пластического формоизменения металла в рабочем конусе волоки [1 – 3].

В настоящей работе показано влияние неоднородных свойств проволоки на ее показатели качества, приведены известные и предлагаемые методики оценки неравномерности деформации проволочной заготовки.

Рост диаметра заготовки увеличивает разницу свойств ее центральных и поверхностных слоев после термической обработки. Перед волочением заготовка может подвергаться химическому или электрохимическому травлению. В процессе травления и нанесения гальванических покрытий происходит наводороживание основного металла. Наибольшее содержание водорода наблюдается в поверхностных слоях заготовки. Проведение термической обработки с целью удаления водорода не всегда приводит к полному восстановлению физико-механических свойств<sup>1</sup> [4, 5]. Сами же катанка и передельная заготовка из углеродистых сталей могут иметь повышенную толщину обезуглероженного слоя, что существенно влияет на различие механических свойств поверхностного слоя и основного металла. Последующая пластическая деформация заготовки с неоднородными по сечению свойствами усиливает полойную анизотропию.

При волочении тонкие металлические и неметаллические покрытия, технологические смазки также могут влиять на свойства поверхностных слоев заготовки. В одних случаях они блокируют при деформации свободный выход дислокаций на поверхность заготовки, в других – способствуют этому выходу. В первом случае наблюдается повышенное упрочнение поверхностных слоев, а во втором – их разупрочнение, пластифицирование, что благоприятно влияет на деформируемость заготовки (см. сноску 1).

Сама механика течения металла в очаге деформации при волочении вызывает разную степень деформации и деформационного упрочнения слоев металла в поперечном сечении [1]. Увеличение суммарной вытяжки и

числа проходов волочения усиливает неоднородность прочностных свойств из-за большей величины сдвиговой деформации поверхностных слоев. Однако непрерывного роста неоднородности от одного прохода волочения к последующему не происходит. С повышением числа проходов усиливается действие эффекта Баушингера на снижение интенсивности упрочнения поверхностных слоев, испытывающих деформацию знакопеременного сдвига [6]. Кроме того, после трех – пяти проходов поперечное сечение не является однородным по прочностным свойствам, а представляет множество кольцевых элементов со своим усредненным пределом текучести [7]. Деформация такого тела вызывает дополнительные напряжения, которые стремятся выровнять величину деформации отдельных его слоев. Это приводит к повышению однородности физико-механических свойств в поперечном сечении. В результате при определенных значениях суммарной деформации проволоки формируются наиболее неоднородная структура и высокий уровень остаточных напряжений. Например, в работе [8] отмечено, что при суммарных степенях деформации  $Q = 40 - 50$  % углеродистой проволоки в ней возникают остаточные напряжения порядка 75 % от предела текучести. У такой проволоки наблюдали несколько меньший уровень усталостной и коррозионной стойкости, чем у проволоки с деформацией  $Q = 75 - 90$  %.

При испытании проволочных образцов диам. 1,8 мм из стали 10X17H13M3T с  $Q = 66$  % обнаружена пониженная стойкость к сульфидному растрескиванию в водном 3 %-ном растворе NaCl ( $pH = 5 - 6$ ), насыщенном сероводородом [9, 10]. При напряжении растяжения испытываемых образцов  $\sigma_p = 0,9\sigma_{s0}$  время до разрушения в среднем составило 360 ч. При других степенях деформации образцы начинали разрушаться после выдержки 1000 ч. Проведение отпуска образцов при температуре 400 °С в течение часа повысило коррозионную стойкость. Образцы проволоки из стали 12X18H10T при  $Q = 66$  % и указанных условиях испытания разрушились в течение 144 ч, а после проведения отпуска при 400 °С время до разрушения увеличилось в два раза. Стойкость холоднотянутых образцов с другой степенью деформации находилась в интервале 200 – 300 ч. Увеличение стойкости к сероводородному растрескиванию проволоки после проведения отпуска вызвано снижением внутренних напряжений [10].

<sup>1</sup> Гурьянов Г.Н. Разработка и внедрение на основе исследования деформируемости металла и режима гидродинамического трения технологии волочения коррозионно-стойкой проволоки: Автореф. дис. канд. техн. наук. – Свердловск, 1986. – 22 с.

Неравномерность деформации в поперечном сечении вызывает различие свойств проволоки в радиальном направлении, которое можно установить экспериментальным путем, например, по замеру микротвердости в поперечном сечении проволоки [2, 11] и электрического сопротивления [12]. Однако при этом необходимо учитывать зависимость прочности, твердости и других свойств не только от степени деформации, но и от напряженного состояния и температуры при волочении. Особенно это касается волочения метастабильных легированных сталей и сплавов, проволоки из углеродистой стали с повышенным содержанием углерода. Например (см. сноску 1), более высокая температура поверхностных слоев снижает интенсивность превращения аустенита в мартенсит деформации при волочении сталей типа 12X18H10T, 08X18H9, X18H8T и т.п. В результате в поверхностных слоях содержится меньшее количество мартенсита, у которого более высокая твердость и прочность, чем у аустенита. По этой причине твердость центральных слоев будет выше при их меньшей суммарной деформации. В других случаях, например при волочении углеродистой проволоки, более высокая температура поверхностных слоев интенсифицирует деформационное старение и повышение прочности стали. Поэтому будут завышены степень деформации поверхностных слоев и неравномерность деформации по поперечному сечению, если для их оценки используется замер микротвердости.

Степень деформации сдвига частиц, движущихся по различным траекториям в очаге пластического формоизменения, определяется как [14]

$$\Lambda = \int_0^{\tau} H(\tau) d\tau,$$

где  $H(\tau)$  – интенсивность скоростей деформации сдвига.

Для осесимметричного деформированного состояния обрабатываемого материала имеем [13]

$$H = \sqrt{2/3} \sqrt{(\xi_{rr} - \xi_{\varphi\varphi})^2 + (\xi_{\varphi\varphi} - \xi_{zz})^2 + (\xi_{zz} - \xi_{rr})^2 + 3/2 \xi_{rz}^2},$$

где  $\xi_{zz}$ ,  $\xi_{rr}$ ,  $\xi_{\varphi\varphi}$ ,  $\xi_{rz}$  – компоненты тензора скоростей деформации.

На рис. 1 показана схема волочения круглой заготовки. Линии тока в очаге деформации приняты прямолинейными. При таком поле линий тока обеспечивается выполнение гипотезы плоских сечений, принимаемой при выводе инженерных формул для расчета прироста осевого напряжения в рабочем конусе волюки. За очагом деформации линии тока параллельны оси проволоки. Выбранные линии тока имеют переломы в плоскостях входа и выхода рабочего конуса, где частицы получают конечную степень деформации [13]:

$$\Lambda_{rp,1} = \text{tg} \alpha \frac{r'_0}{r_0}; \quad \Lambda_{rp,2} = \text{tg} \alpha \frac{r'_k}{r_k}. \quad (1)$$

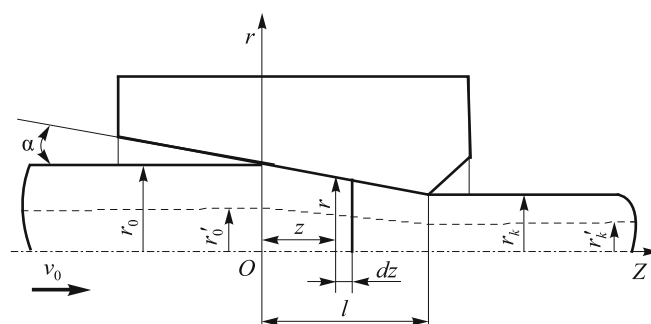


Рис. 1. Схема волочения проволоки:  $r_0, r'_0, r_k, r'_k$  – соответственно радиусы заготовки и рассматриваемой траектории до и после обжатия

В формулах (1) геометрические параметры  $r'_0$  и  $r'_k$  изменяются в радиальном направлении от нуля и соответственно до  $r_0$  и  $r_k$ . Интенсивность изменения в радиальном направлении степени деформации на входе  $\Lambda_{rp,1}$  и выходе  $\Lambda_{rp,2}$  очага деформации характеризуют производные по переменным параметрам  $r'_0$  и  $r'_k$ :

$$\frac{d\Lambda_{rp,1}}{dr'_0} = \frac{\text{tg} \alpha}{r_0}; \quad \frac{d\Lambda_{rp,2}}{dr'_k} = \frac{\text{tg} \alpha}{r_k} = \frac{\sqrt{\mu} \text{tg} \alpha}{r_0}, \quad (2)$$

которые позволяют оценить неравномерность деформации сдвига на границах раздела жестких и пластической зон в поперечном сечении проволоки. Неравномерность деформации на границах очага деформации ( $\Lambda_{rp,1}$  и  $\Lambda_{rp,2}$ ) по сечению проволоки тем больше, чем больше угол  $\alpha$  и коэффициент вытяжки (только для  $\Lambda_{rp,2}$ ) и меньше исходный радиус заготовки  $r_0$ . Коэффициент вытяжки за проход волочения в формуле (2) определяется через начальный и конечный радиусы заготовки, т.е.  $\mu = r_0^2/r_k^2$ .

В очаге деформации частицы испытывают полную деформацию  $\Lambda$ , вызванную деформацией растяжения-сжатия  $\Lambda_1$  и сдвиговой деформацией  $\Lambda_2$  в плоскости  $rOz$  [15]:

$$\begin{aligned} \Lambda &= \sqrt{\Lambda_1^2 + \Lambda_2^2}; \\ \Lambda_1 &= 2\sqrt{3} \ln(r_0/r); \\ \Lambda_2 &= 2 \text{tg} \alpha \ln(r_0/r)(r'/r). \end{aligned} \quad (3)$$

В формулах (3) текущий наружный радиус проволоки и радиус промежуточного слоя в очаге деформации обозначены соответственно  $r$  и  $r'$ . В конкретном поперечном сечении параметр  $r$  является постоянной величиной, а  $r'$  – переменной.

Неравномерность деформации в радиальном направлении от действия сдвиговой деформацией  $\Lambda_2$  в рабочем конусе волюки можно также оценить первой производной по параметру  $r'$ :

$$\frac{d\Lambda_2}{dr'} = \frac{2 \text{tg} \alpha \ln(r_0/r)}{r}.$$

Значения производных для  $\Lambda_{гр.1}$ ,  $\Lambda_{гр.2}$  и  $\Lambda_2$  постоянные, т.е. в поперечном сечении с радиусом  $r$  постоянна интенсивность изменения этих деформаций в радиальном направлении.

Выясним характер изменения деформации  $\Lambda$  и ее определяющей составляющей  $\Lambda_1$  вдоль оси волочения. Для этого вычислим значения деформаций  $\Lambda_1$ ,  $\Lambda$  и их первых производных по координате  $z$  в поперечном сечении, удаленном на расстоянии  $z$  от начала пластического течения металла при разных значениях угла  $\alpha$ :

$$\frac{d\Lambda_1}{dz} = \frac{d(2\sqrt{3} \ln(r_0/(r_0 - z \operatorname{tg}\alpha)))}{dz} = \frac{2\sqrt{3} \operatorname{tg}\alpha}{r_0 - z \operatorname{tg}\alpha}; \quad (4)$$

$$\frac{d\Lambda}{dz} = \frac{2\sqrt{3 + \operatorname{tg}^2\alpha (r_0'/r)^2} \operatorname{tg}\alpha}{r_0 - z \operatorname{tg}\alpha}. \quad (5)$$

На рис. 2 приведены зависимости степени деформации сдвига  $\Lambda_1$  и  $\Lambda$ , первой производной  $d\Lambda/dz$  (5), которая несущественно больше производной  $d\Lambda_1/dz$  (4), как сама величина  $\Lambda$  больше определяющей составляющей  $\Lambda_1$ . Расчет выполнен при исходных диам. 0,2 и 2,0 мм.

При расчете исследуемых параметров для диам. 2,0 мм варьирование координаты  $z$  увеличили в 10 раз, чтобы выполнилось геометрическое подобие формы очага деформации для проволоки диам. 0,20 и 2,0 мм. В результате получили равенство значений  $\Lambda_1$  и  $\Lambda$  и одинаковую форму линий уровня графиков для заготовок диам. 0,2 мм (рис. 2, а, б) и 2,0 мм (рис. 2, з, д). Форма линий уровня для производной  $d\Lambda/dz$  также одинакова, а ее значение уменьшилось в 10 раз для диам. 2,0 мм (рис. 2, в, е). Значения полной деформации  $\Lambda$  и ее произ-

водной рассчитаны для поверхностного слоя ( $r_0'/r = 1$ ). Для центрального слоя эти значения несколько меньше.

На рис. 3 даны зависимости значения первой производной  $\Lambda$  при  $\alpha = 6^\circ$  и  $\alpha = 12^\circ$  для заготовок с исходным диам. 2,0 и 10,0 мм. Увеличение сечения заготовки и уменьшение угла  $\alpha$  снижают скорость роста деформации  $\Lambda$  вдоль длины рабочего конуса волюки. Графики рис. 2 и 3 показывают, что скорость изменения величины деформации  $\Lambda_1$  и  $\Lambda$  вдоль оси волочения больше зависит от исходного диаметра заготовки и угла  $\alpha$ , чем от расстояния  $z$ .

Графики  $\Lambda_1$ ,  $\Lambda$  и их производных позволяют однозначно определить расположение области интенсивного изменения степени деформации вдоль оси волочения. В первом случае область имеет более высокую плотность линий равного уровня для степени деформации  $\Lambda_1$  и  $\Lambda$  (рис. 2, а, б, з, д). Во втором случае она определяется по значению линий уровня для производной  $d\Lambda/dz$  (рис. 2, в, е).

С уменьшением степени обжатия за проход волочения значительно снижается величина определяющей составляющей полной деформации  $\Lambda_1$ , которая охватывает все поперечное сечение проволоки. Но при этом не изменяются значения деформации на передней и задней границах очага деформации  $\Lambda_{гр.1}$  и  $\Lambda_{гр.2}$ . В результате значительно возрастет различие степени полной деформации в радиальном направлении.

Оценку неравномерности деформации можно выполнить также через другие характеристики деформированного состояния, например, [11]:

$$\Phi_H = \bar{\epsilon} / \epsilon, \quad (6)$$

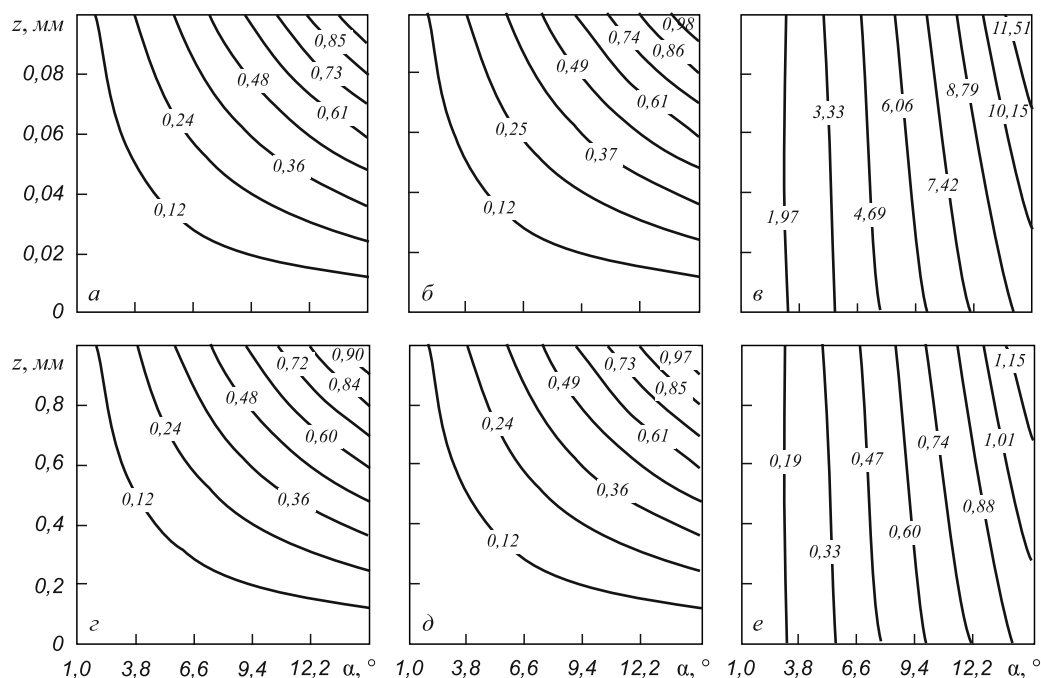


Рис. 2. Линии равного уровня  $\Lambda_1$  (а, з),  $\Lambda$  (б, д) и производной  $d\Lambda/dz$  (в, е) в зависимости от угла  $\alpha$  и расстояния  $z$ : а, б, в – при диам. 0,20 мм; з, д, е – при диам. 2,0 мм

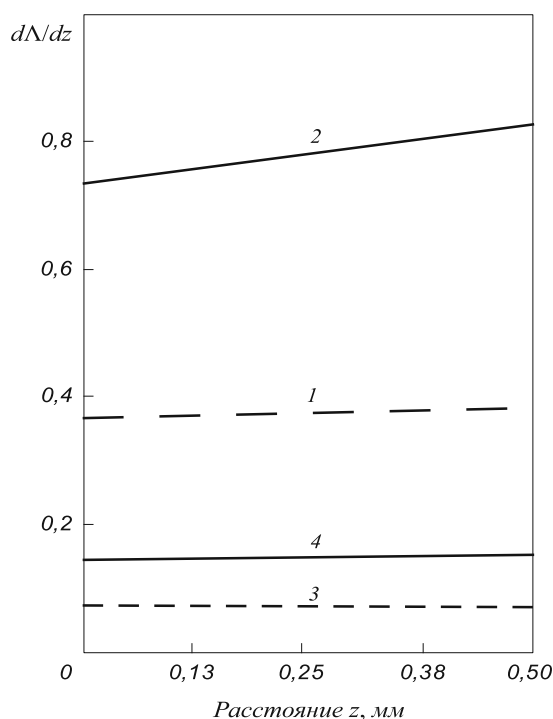


Рис. 3. Величина производной  $d\Lambda/dz$  в поперечном сечении заготовки, отстоящем на расстоянии  $z$  от передней границы очага деформации:

1, 2 – диам. 2,0 мм; 3, 4 – диам. 10,0 мм;  
 ----  $\alpha = 6^\circ$ ; —  $\alpha = 12^\circ$

где  $\bar{\epsilon}$  – средняя относительная деформация по объему  $V$  очага пластической деформации, определяемая из равенства

$$\bar{\epsilon}V = \int_V \epsilon' dV. \quad (7)$$

Интеграл (7) включает значение относительной деформации  $\epsilon'$  в конкретной точке, малом объеме очага деформации. В формуле (6) деформация  $\epsilon = (r_0^2 - r_k^2)/r_0^2$  определяется ее линейными компонентами и не учитывается деформация сдвига металла.

Очевидным является то, что по аналогии с выражением (6) неравномерность деформации можно оценить через степень деформации сдвига:  $\Phi_n = \bar{\Lambda}/\Lambda$ .

Для теории и практики волочения важно установить характер связи количественных показателей неравномерности деформации с безразмерными геометрическими параметрами очага деформации. Например, в работе [11] построены зависимости показателя  $\Phi_n$  от параметра  $\Delta$ :

$$\Delta = \alpha(1 + \sqrt{1 - \epsilon})^2 / \epsilon, \quad (8)$$

где  $\alpha$  – угол наклона образующей рабочего конуса волокна в радианах.

Поскольку безразмерный комплекс формы  $\Delta$  включает две величины  $\alpha$  и  $\epsilon$ , одна из которых, в свою очередь, обусловлена значениями исходного и конечного

диаметров проволоки, то не очевиден его физический смысл. Кроме того, показатель неравномерности  $\Phi_n$  (6) рассчитывается через деформации  $\epsilon'$  в элементарных объемах очага пластической деформации. Если значения  $\epsilon'$  не определены экспериментально, например методом измерения твердости по Виккерсу, то для расчета критерия  $\Phi_n$  необходимо решить сложную задачу по определению деформированного состояния металла в различных частях объема пластического формоизменения металла. Поэтому проблематично установить зависимость  $\Phi_n$  от комплекса  $\Delta$  без проведения экспериментальных исследований.

Пусть методом замера твердости для каждого элементарного объема очага деформации определены значения деформации  $\epsilon_i$ . Тогда неоднородность распределения деформации в объеме можно оценить дисперсией  $S^2$ , среднеквадратическим отклонением  $S$  или коэффициентом вариации  $v$ :

$$S^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\epsilon_i - \bar{\epsilon})^2; \quad S = \sqrt{S^2}; \quad v = S/\bar{\epsilon},$$

здесь  $v$  – количество элементарных объемов, а точнее площадей поперечного сечения образца, где определено значение микротвердости  $\epsilon_i$ ;  $\bar{\epsilon}$  – среднее значение деформации в очаге пластического течения металла.

Можно строить зависимость численных характеристик неравномерности деформации (например,  $\Phi_n$ ,  $S^2$ ,  $S$  или  $v$ ) от других безразмерных комплексов, отражающих геометрию очага деформации, например в виде отношения  $l/d_{cp}$  или  $d_{cp}/l$  [11], включающего среднюю величину диаметра проволоки в очаге деформации  $d_{cp}$  и его длину  $l$ . Если же воспользоваться теорией подобия и моделирования, то можно получить критерии

$$\begin{aligned} \bar{\alpha} &= \alpha/\mu = \alpha r_k^2/r_0^2; \\ \bar{\mu} &= \mu/\alpha = r_0^2/(\alpha r_k^2); \\ \bar{\alpha}\bar{\mu} &= 1. \end{aligned} \quad (8)$$

Критерии формы очага деформации – приведенный угол  $\bar{\alpha}$  в отношении величины обжатия и приведенная величина обжатия  $\bar{\mu}$  – рассчитываются более просто (чем параметры  $\Delta$  и  $d_{cp}/l$ ) через независимые параметры очага деформации  $r_0$ ,  $r_k$  и  $\alpha$ , которые определяются непосредственным замером диаметра проволоки до и после деформации и угла рабочего конуса. Критерий  $\bar{\alpha}$  – отношение показателей сдвиговой и линейной деформации поверхностного слоя на выходе рабочего конуса волокна – отражает степень неоднородности деформированного состояния за проход волочения. Параметр  $\bar{\mu}$  – обратная величина  $\bar{\alpha}$  – является мерой однородности деформации частицы поверхностного слоя к моменту выхода ее из волокна. При переменной величине угла  $\alpha$  (используется волокна с радиальной или сигмоидальной рабочей поверхностью) или при овальной форме поперечного сечения заготовки неравномерность деформации долж-



на ставиться в зависимости и от других безразмерных комплексов, отражающих особенность формы рабочего канала волокна и поперечного сечения заготовки.

Неоднородность прочностных свойств в поперечном сечении, вызванная технологическими факторами производства проволоки или неравномерным распределением деформации в рабочем конусе волокна, может повлиять на стабильность протекания процесса волочения без макроразрушения заготовки. При определенных условиях волочения на выходе волокна может образоваться внеконтактная деформация проволоки [2, 7, 14]. Если представить проволоку в виде многослойного тела, то в месте локализации внеконтактной деформации осевое и радиальное напряжения и показатель напряженного состояния  $k_{\sigma}$  составят [7]:

$$\sigma_{zi} = \sigma_{si} \left( 1 + \frac{a_i^2 - r^2}{2Ra} \right) + \sum_{i=1}^{n-1} \sigma_{si-1} \left( \frac{a_{i-1}^2 - a_i^2}{2Ra} \right);$$

$$\sigma_{ri} = \sigma_{si} \left( \frac{a_i^2 - r^2}{2Ra} \right) + \sum_{i=1}^{n-1} \sigma_{si-1} \left( \frac{a_{i-1}^2 - a_i^2}{2Ra} \right);$$

$$k_{\sigma i} = \frac{1}{\sqrt{3}} + \sqrt{3} \left( \frac{a_i^2 - r^2}{2Ra} \right) + \frac{\sqrt{3}}{\sigma_{si}} \sum_{i=1}^{n-1} \sigma_{si-1} \left( \frac{a_{i-1}^2 - a_i^2}{2Ra} \right),$$

где  $\sigma_{si}$  – предел текучести  $i$ -го элемента;  $\sigma_{si-1}$  – предел текучести  $(i-1)$ -го элемента, находящегося ближе к свободной поверхности образца;  $a_i$  и  $a_{i+1}$  – соответственно наружный и внутренний радиусы  $i$ -го элемента;  $R$  – радиус кривизны профиля шейки образца в продольном осевом сечении;  $a$  – радиус поперечного сечения шейки в самом тонком месте ( $a = a_1$ );  $i$  – номер границы  $i$ -го элемента со стороны свободной поверхности, или номер  $i$ -го элемента образца;  $r$  – радиус слоя металла в рассматриваемом  $i$ -ом элементе;  $a_{i+1} \leq r \leq a_i$ ;  $k_{\sigma}$  – показатель напряженного состояния, определенный по В.Л. Колмогорову [15].

Анализ приведенных уравнений показывает, что для центральных слоев создается неблагоприятная схема напряженного состояния, которая способствует их разрушению. Чем выше уровень прочностных свойств поверхностных слоев в сравнении с центральными и больше диаметр протягиваемой проволоки, тем выше вероятность разрушения центральных слоев и в целом проволоки.

Следует отметить, что традиционные методы расчета напряжений волочения по усредненному пределу текучести в очаге деформации (инженерный метод, методы линий скольжения и работ) дают приближенную оценку напряженного состояния. Поэтому для строгого расчета напряжений в очаге пластического формоизменения композитной проволоки, какой является и проволока с послойным различием физико-механических свойств, целесообразно использовать вариационные принципы определения напряженно-деформированного состояния [15].

**Выводы.** Предложено степень неравномерности деформации в радиальном и осевом направлениях оценивать значением первой производной степени деформации сдвига по соответствующей координате. Прирост деформации в осевом направлении увеличивается с ростом угла рабочего конуса волокна и уменьшением исходного диаметра заготовки. С уменьшением обжатия увеличивается доля сдвиговой деформации на границах рабочей зоны волокна в общей деформации заготовки за проход волочения. Это приводит к сопоставимости значений сдвиговой деформации поверхностных слоев и средней деформации в поперечном сечении проволоки и усилению неравномерности деформации в поперечном сечении. В случае образования внеконтактной деформации послойное различие прочностных свойств, вызванное деформационным упрочнением, усиливает вероятность разрушения проволоки вследствие образования жесткой схемы напряженного состояния в центральных слоях обрабатываемого металла.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Губкин С.И. Теория обработки металлов давлением. – М.: Металлургиздат, 1947. – 532 с.
2. Перлин И.Л., Ерманок М.З. Теория волочения. – М.: Металлургия, 1971. – 447 с.
3. Изготовление высококачественных метизов (научный и практический опыт Белоречского металлургического комбината) / Кулеша В.А., Клековкина Н.А., Белалов Х.Н. и др. – Белоречск: изд. Белоречского гос. ун-та, 1999. – 328 с.
4. Гурьянов Г.Н., Салтук В.Н., Смирнов С.В., Терских С.А. // Сталь. 2008. № 3. С. 66, 67.
5. Гурьянов Г.Н., Колмогоров В.Л., Гладышев В.Ф. // Физ.-хим. механика материалов. АН УССР. Наукова думка. 1989. № 1. С. 74 – 77.
6. Богатов А.А., Мижирицкий О.И., Смирнов С.В. Ресурс пластичности металлов при обработке металлов давлением. – М.: Металлургия, 1984. – 144 с.
7. Гурьянов Г.Н. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2009. № 3. С. 13 – 16.
8. Семавина А.Н., Гаврилюк В.Г., Терских С.А. и др. // Физ.-хим. механика материалов. АН УССР. Наукова думка. 1979. № 2. С. 36 – 40.
9. Процив И.М., Гурьянов Г.Н., Иванов В.П. и др. // Физ.-хим. механика материалов. АН УССР. Наукова думка. 1985. № 5. С. 96 – 99.
10. Разработка и освоение производства проволоки, канатов и кабелей, предназначенных для работ в средах, содержащих до 25% сероводорода / Иванов В.П., Гурьянов Г.Н., Белалов Х.Н. и др. – Магнитогорск: ВНИИметиз, 1985. № Г.Р. 01850018374. – 43 с.
11. Бэкофен В. Процессы деформации / Пер с англ. В.С. Берковского, Ф.И. Рузанова. – М.: Металлургия, 1977. – 288 с.
12. Герасимов В.Я., Третьяков А.П. // Сталь. 2003. № 3. С. 53, 54.
13. Колмогоров В.Л. Напряжения, деформации, разрушение. – М.: Металлургия, 1970. – 229 с.
14. Гурьянов Г.Н. Расчет, анализ напряжений, деформаций и запаса прочности при холодном волочении проволоки. – Магнитогорск: изд. ГОУ ВПО «МГТУ», 2008. – 358 с.
15. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением: Учебник для вузов, 2-е изд. перераб. и доп. – Екатеринбург: Изд-во УГТУ – УПИ, 2001. – 836 с.