



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-3-56-60>
УДК 669

Поступила 19.06.2025
Received 19.06.2025

ОЦЕНКА НЕРАВНОМЕРНОСТИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ ВЫСОКОПРОЧНОЙ ПРОВОЛОКИ ИЗ ПЕРЛИТНОЙ СТАЛИ

В. П. ФЕТИСОВ, г. Орел, Россия. E-mail: olga1560@yandex.ru

Контролем пластических свойств проведено сравнение надежности предварительной оценки неравномерности пластической деформации в процессе многократного волочения высокопрочной проволоки с помощью расчетного геометрического параметра клиновидной зоны и экспериментально определяемого подъема металла на входе в рабочий конус волоки. Геометрический параметр клиновидной зоны не характеризует влияние на формирование пластических свойств повышения прочности, соотношения сжимающих и растягивающих напряжений в очаге деформации при изменении единичного обжатия и поэтому не может применяться в качестве показателя неравномерности пластической деформации при многократном волочении высокопрочной проволоки из перлитной стали. Определяемый при волочении на разъемных волоках подъем металла на входе в деформационную зону волочильного инструмента обладает повышенной чувствительностью к изменению основных технологических параметров процесса волочения и соответствует критерию неравномерности пластической деформации высокопрочной стали. С увеличением суммарного обжатия при волочении высокопрочной проволоки дополнительной оценкой неравномерности пластической деформации является соотношение сжимающих и растягивающих напряжений в схеме объемного напряженного состояния. Для повышения равномерности деформации при многократном волочении высокопрочной проволоки необходимо снижение единичных обжатий и уменьшение угла рабочего конуса волоки по мере роста суммарной степени деформирования. Деформацию волочением следует осуществлять с противонапряжением и в режиме гидродинамического трения.

Ключевые слова. Геометрический параметр клиновидной зоны, подъем металла на входе в рабочий конус волоки, неравномерность пластической деформации, соотношение при волочении сжимающих и растягивающих напряжений.

Для цитирования. Фетисов, В. П. Оценка неравномерности пластической деформации при волочении высокопрочной проволоки из перлитной стали / В. П. Фетисов // *Литье и металлургия*. 2025. № 3. С. 56–60. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-3-56-60>.

ASSESSMENT OF THE UNEVENNESS OF PLASTIC DEFORMATION IN DRAWING HIGH-STRENGTH PEARLITE STEEL WIRE

V. P. FETISOV, Orel, Russia. E-mail: olga1560@yandex.ru

Under the control of plastic properties, the reliability of a preliminary assessment of the unevenness of plastic deformation during repeated drawing of high-strength wire was compared using the calculated geometric parameter of the wedge-shaped zone and the experimentally determined metal lift at the entrance to the working cone of the drawing. The geometric parameter of the wedge-shaped zone does not characterize the effect on the formation of plastic properties of increased strength, the ratio of compressive and tensile stresses in the deformation zone with a change in a single compression, and therefore cannot be used as an indicator of the unevenness of plastic deformation during repeated drawing of high-strength wire made of pearlite steel. The rise of metal at the entrance to the deformation zone of the drawing tool, determined by drawing on split lugs, is highly sensitive to changes in the main technological parameters of the drawing process and meets the criterion of uneven plastic deformation. To increase the uniformity of deformation during repeated drawing of high-strength wire, it is necessary to reduce single compressions and reduce the angle of the working cone of the drawing as the total degree of deformation increases, as well as to carry out deformation by drawing with counter-tension and in the mode of hydrodynamic friction.

Keywords. The geometric parameter of the wedge-shaped zone, the rise of metal at the entrance to the working cone of the drawing, the unevenness of plastic deformation, the ratio of compressive and tensile stresses during drawing.

For citation. Fetisov V. P. Assessment of the unevenness of plastic deformation in drawing high-strength pearlite steel wire. *Foundry production and metallurgy*, 2025, no. 3, pp. 56–60. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2025-3-56-60>.

Пластическая деформация волочением в условиях объемного напряженного состояния характеризуется неравномерностью по сечению проволоки. Конусный очаг деформации и внешнее трение обеспечивают отставание периферийных слоев от центральных, которое в зависимости от исходной прочности металла проявляется в уменьшении или повышении (подъеме металла) диаметра проволоки в начале деформационной

зоны волочильного инструмента [1]. При этом оценку неравномерности деформации осуществляют при волочении через разъемные волокни или на образцах проволоки, заторможенных в рабочем конусе волокни. Применительно к высокопрочной перлитной стали неравномерность пластической деформации сопровождается подъемом металла на входе в рабочий конус волочильного инструмента [2].

При волочении перлитной стали отмечается также структурная неоднородность пластической деформации. Отсутствие совместимости деформации пластин цементита и феррита, особенно в колониях перлита, ориентированных с отклонениями от оси проволоки, а также распад карбидной фазы при пластической деформации вызывают разрушение пластин цементита и потерю пластинчатого строения перлита [3].

Влияние отмеченных деформационного и структурного факторов, повышения неравномерности пластической деформации на снижение пластических свойств холоднодеформированной проволоки обусловлено возникновением дополнительных растягивающих напряжений и образованием микротрещин [4], что требует предварительной оценки неравномерности деформации при разработке технологического процесса волочения проволоки.

Наряду с экспериментальным определением подъема металла на входе в рабочий конус волокни известен [5] способ оценки неравномерности пластической деформации с помощью расчетного геометрического параметра клиновидной зоны Δ , который определяется отношением среднего диаметра проволоки в очаге деформации к длине контактной линии инструмента. По мнению В.Бэкофена [5], условия равномерной пластической деформации обеспечиваются при $\Delta \leq 1$, а при значениях более единицы деформация не проникает до оси проволоки. При этом для параметра клиновидной зоны $\Delta \approx 2-3$ возможно осевое разрушение проволоки [6].

Влияние структурного фактора неравномерности пластической деформации на формирование пластичности холоднодеформированной перлитной стали рассмотрено в [7].

Целью настоящей работы является сравнение надежности предварительной оценки неравномерности пластической деформации при многократном волочении высокопрочной проволоки из перлитной стали при расчете геометрического параметра клиновидной зоны и контроле подъема металла на входе в рабочий конус волочильного инструмента.

В табл. 1 [2] представлены результаты определения подъема металла при волочении проволоки на разрывной машине УММ-5 со скоростью 50 мм/мин с использованием разъемных вилок, внутренний канал которых подвергался фосфатированию. Заостренные образцы проволоки тщательно выпрямлялись. Диаметр проволоки на входе в очаг деформации определили на инструментальном микроскопе БМИ-1 по отпечатку на волоке. Угол рабочего конуса волок β составлял $6^\circ 35'$ и $16^\circ 35'$, прочность патентированной и предварительно деформированной (31,5 и 43,7 %) стали 80, 70 и 60 изменялась от 940,8 до 1548 Н/мм², а единичное обжатие – от 24,5 до 31,1 %

С повышением прочности патентированной стали (табл. 1) подъем металла возрастает: с 1,43 % для стали 60 до 1,58 % для стали 80 при волочении с единичным обжатием 30,5 % и для угла рабочего конуса волоки $16^\circ 35'$. Предварительное деформирование также повышает неравномерность деформации: с 1,58 до 1,74 % для стали 80 и $\beta = 16^\circ 35'$, а для стали 70 и угла рабочего конуса $6^\circ 35'$ – с 0,208 до 0,415 %. Сравнение при волочении патентированной стали 60 с единичными обжатиями 30,5–31,1 % показывает, что увеличение β с $6^\circ 35'$ до $16^\circ 35'$ повышает подъем металла с 0,40 до 1,43 %, а рост для этой стали единичного обжатия с 24,5 до 30,5 % и для угла рабочего конуса волоки $16^\circ 35'$ увеличивает неравномерность деформации с 1,33 до 1,43 %. При этом из-за подъема металла повышается степень единичной деформации от 0,4 до 2,4 %.

Т а б л и ц а 1. Результаты определения подъема металла на входе в очаг деформации и расчета геометрического параметра клиновидной зоны

Марка стали	Степень предварительной деформации, %	Временное сопротивление разрыву проволоки до волочения, Н/мм ²	Угол рабочего конуса волоки, β	Диаметр проволоки, мм			Степень единичной деформации, $\frac{d_0^2 - d_2^2}{d_0^2} 100\%$	Подъем металла на входе в очаг деформации, $\frac{d_1 - d_0}{d_1} 100\%$	Степень единичной деформации с учетом подъема металла, $\frac{d_1^2 - d_2^2}{d_1^2} 100\%$	Параметр клиновидной зоны, Δ
				до волочения, d_0	в начале зоны контактной деформации, d_1	после волочения, d_2				
80	0,0	1259,3	$16^\circ 35'$	6,20	6,30	5,17	30,5	1,58	32,6	1,59
	31,5	1548,4			6,31			1,74	32,9	1,59
60	0,0	940,8	$16^\circ 35'$	6,20	6,29	5,17	30,5	1,43	32,4	1,59
	0,0	960,4			5,95			1,33	26,5	2,05
70	0,0	1029,0	$6^\circ 35'$	4,79	4,80	4,15	24,9	0,208	25,3	0,80
	43,7	1430,8			4,82			0,415	25,9	0,79
60	0,0	970,2	$6^\circ 35'$	5,0	5,02	4,15	31,1	0,40	31,7	0,62

Экспериментальные данные по исследованию подъема металла на входе в очаг деформации дополнены расчетом параметра Δ (табл. 1). Полученные результаты свидетельствуют, что геометрический параметр клиновидной зоны повышается с уменьшением единичного обжатия и с увеличением угла рабочего конуса волоки.

Расчеты параметра Δ показывают также, что условиям равномерной деформации отвечает только волочение с использованием волок с малым углом рабочего конуса ($\beta = 6^\circ 35'$) для стали 60 и 70 и единичного обжатия 24,9–31,1%, а осевое разрушение ($\Delta = 2,05$) проволоки может возникнуть для $\beta = 16^\circ 35'$ и единичного обжатия 24,5% при волочении стали 60.

Из сравнения для перлитных сталей показателей подъема металла и параметра клиновидной зоны видно, что прямо пропорциональная зависимость отмечается только для угла рабочего конуса волоки, а для величины единичного обжатия – противоположное влияние на равномерность пластической деформации.

Наличие зависимости накопления необратимой повреждаемости структуры и пластических свойств от условий деформирования позволяет использовать показатели пластичности для оценки влияния величины единичного обжатия на формирование неравномерности пластической деформации.

В табл. 2 [8] приведены результаты многократного волочения проволоки диаметром 2,2 мм из стали 65 с пониженными единичными обжатиями (6,1 против 20,7% и, соответственно, Δ на чистовом переходе: 6,67 против 1,81). Эксперименты показали хотя и незначительный, но рост числа скручиваний. Увеличение при волочении суммарного обжатия с 75 до 97,9% усиливает влияние снижения единичной степени деформации с 16,5 до 13,2% на рост числа скручиваний холоднодеформированной проволоки диаметром 0,187 мм из стали 80 (табл. 3) [8].

Таблица 2. Влияние величины среднего единичного обжатия на механические свойства проволоки диаметром 2,2 мм из стали 65, деформированной с суммарным обжатием 75%

Среднее единичное обжатие, %	Предел прочности, Н/мм ²	Число скручиваний $\frac{\min - \max}{\text{среднее}}$
20,7 (6 переходов)	1579,7	$\frac{37 - 40}{39}$
6,1 (22 перехода)	1556,2	$\frac{38 - 45}{41}$

Таблица 3. Влияние единичной степени деформации на свойства латунированной проволоки диаметром 0,187 мм из высокочистой стали 80, деформированной с суммарным обжатием 97,9%

Единичное обжатие, %	Предел прочности, Н/мм ²	Число скручиваний на базе 300d
16,5	3298	131
14,7	3182	141
13,2	3087	147

Повышение числа скручиваний, весьма чувствительной характеристики к внутренним и поверхностным дефектам металла, ставит под сомнение необходимость волочения с повышенными единичными обжатиями, исходя из требований расчета геометрического параметра клиновидной зоны. При этом возражения против указанной технологической рекомендации усиливаются при применении малых обжатий для волочения предварительно деформированной с повышенной суммарной степенью деформации проволоки.

Так, применительно к ультравысокопрочной проволоке диаметром 0,18 мм для металлокорда при волочении патентованной и латунированной заготовки диаметром 1,49 мм из особо чистой стали (C = 0,87%) дополнительная деформация волочением составила: 5,2% после 23-го перехода; 4,95% после 24-го перехода и 3,3% после чистового 25-го перехода в маршруте волочения (Евразийский патент 002443). Полученные свойства проволоки (числитель) по сравнению с традиционными обжатиями (знаменатель) характеризовались следующими значениями: предел прочности – 4083/4095 Н/мм², относительное удлинение на базе 200 мм – 1,2/0,75%; число переменных скручиваний – 88/14 [8]. Результаты исследования показали, что число переменных скручиваний, которые являются наиболее структурно чувствительной характеристикой пластичности холоднодеформированной стали [2], возрастает в 6,3 раза с 14 до 88, соответственно, для единичных обжатий (q) и параметра клиновидной зоны на чистовом переходе в маршруте волочения: $q = 17,6\%$ и $\Delta = 1,99$ против $q = 3,3\%$ и $\Delta = 12,8$.

Эффективность чередования нормальных и малых обжатий (2,3–2,9%) на последних переходах в маршруте волочения заэвтектидной стали ($C = 0,99\%$) показана также в [9]: достигнуто повышение порога прочности расслоения проволоки с 3636 Н/мм^2 на диаметре $0,313 \text{ мм}$ до 4182 Н/мм^2 на диаметре $0,237 \text{ мм}$.

Характерной особенностью волочения с малыми единичными обжатиями является повышение доли сжимающих напряжений в схеме объемного напряженного состояния. В [8] установлено, что при единичном обжатии $q > 15,75\%$ сжимающие напряжения становятся меньше растягивающих, а при $q < 15,75\%$ в схеме деформации волочением превалируют сжимающие напряжения, причем их величина возрастает с уменьшением единичной степени деформации.

Исследования [2, 8] показали, что малые деформации на последних переходах многократного волочения с большими суммарными обжатиями изменяют соотношение твердости поверхностных и центральных слоев проволоки с превышением прочности поверхности металла. При этом при контроле прочностных и пластических свойств растяжением и кручением более прочный поверхностный слой проволоки служит барьером для дислокационных скоплений подповерхностных слоев, прорыв которого при деформации сопровождается увеличением плотности подвижных дислокаций, незначительным разупрочнением и существенным повышением пластических характеристик.

Повышению пластичности холоднодеформированной проволоки способствует также наведение в дополнительных плоскостях скольжения новых незакрепленных дислокаций с ростом величины сжимающих напряжений при уменьшении единичных обжатий.

Подтверждением доминирующей роли сжимающих напряжений в повышении пластичности служит исследование [8] влияния увеличения доли сжимающих напряжений в схеме деформации за счет отсутствия цилиндрической части в канале волоки. Использование на чистовом переходе многократного волочения проволоки диаметром $0,30 \text{ мм}$ из стали 80 волоки без цилиндрической части повышает (табл. 4) в 2,1 раза показатель $Y_{\text{БВ}}$, который является одним из критериев усталостной долговечности холоднодеформированного металла [2], и в 1,09 раза общее удлинение проволоки.

Таблица 4. Результаты применения на чистовом переходе многократного волочения проволоки волоки с цилиндрической (числитель) и без цилиндрической (знаменатель) части

Свойства патентованной заготовки		Свойства проволоки после предчистового перехода		Свойства проволоки диаметром $0,30 \text{ мм}$ после волочения на чистовом переходе			
Диаметр, мм	$\sigma_{\text{в}}, \text{ Н/мм}^2$	Диаметр, мм	$\sigma_{\text{в}}, \text{ Н/мм}^2$	$\sigma_{\text{в}}, \text{ Н/мм}^2$	$\sigma_{02}, \text{ Н/мм}^2$	$Y_{\text{БВ}} = (\sigma_{\text{в}} - \sigma_{02}) / \sigma_{02}$	$\delta_{\text{общ}}, \%$
1,7	1263	0,319	2888	2991	2831	0,056	1,74
				2982	2672	0,12	1,90

Поэтому учет соотношения сжимающих и растягивающих напряжений в схеме объемного напряженного состояния может служить дополнительным способом предварительной оценки неравномерности пластической деформации при волочении высокопрочной проволоки из перлитной стали.

Технологический анализ результатов исследования (табл. 1) показывает, что для повышения равномерности пластической деформации при многократном волочении высокопрочной проволоки необходимо:

1) снижать единичные обжатия и угол рабочего конуса волок по мере роста степени предварительного деформирования и прочности проволоки;

2) осуществлять волочение проволоки с противонапряжением: $\sigma_q = H_{\text{пр}} + \Delta H_{\text{В}}^{\text{П}}$, включающим напряжение ($H_{\text{пр}}$) выравнивания (правки) и прирост напряжения волочения из-за подъема металла на входе в очаг деформации ($\Delta H_{\text{В}}^{\text{П}}$) и составляющим 15–20% от временного сопротивления разрыву проволоки перед волочением [10];

3) обеспечить волочение проволоки в режиме гидродинамического трения за счет использования мыльниц с вращающимся волокодержателем и непосредственным охлаждением обоймы сборной волоки по а.с. 169 55 75 СССР.

Повышение пластичности высоко-, сверхвысоко- и ультравысокопрочной проволоки достигается при увеличении доли сжимающих напряжений в схеме деформации за счет снижения единичного обжатия и применения волок без цилиндрической части на последних переходах многократного волочения с большими суммарными обжатиями.

Обработка результатов экспериментов (табл. 1) позволила определить следующую зависимость подъема металла от прочности проволоки, единичного обжатия и угла рабочего конуса волоки:

$$\Pi (\%) = 0,005 \sigma_{\text{в}} (\text{кгс/мм}^2) + 0,02 q (\%) + 0,11 \beta (\text{градус}) - 1,50.$$

Выводы

1. Геометрический параметр клиновидной зоны не может служить показателем неравномерности пластической деформации при многократном волочении высокопрочной проволоки из перлитной стали, так как не отражает влияния на формирование пластических свойств повышения прочности и соотношения сжимающих и растягивающих напряжений в схеме деформации.
2. Определяемый при волочении с использованием разъемных волок подъем металла на входе в рабочий конус волочильного инструмента обладает повышенной чувствительностью к изменению основных технологических параметров процесса волочения и соответствует критерию неравномерности пластической деформации высокопрочной стали.
3. Контроль соотношения сжимающих и растягивающих напряжений при волочении предварительно деформированной с большими суммарными обжатиями проволоки дополняет оценку неравномерности пластической деформации перлитной стали. Превышение сжимающих напряжений в схеме деформации увеличивает пластические свойства холоднодеформированной проволоки.
4. Определены технологические направления уменьшения неравномерности пластической деформации при волочении проволоки повышенной прочности и сохранения запаса пластичности, необходимого для промышленной реализации полученного высокопрочного состояния.
5. Получено экспериментальное выражение зависимости подъема металла от прочности проволоки, единичного обжатия и угла рабочего конуса волоки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Перлин, И.Л. Теория волочения / И.Л. Перлин, М.З. Ерманок. – М.: Metallurgiya, 1971. – 448 с.
2. Фетисов, В.П. Деформационное старение стали при волочении проволоки / В.П. Фетисов. – Минск: Белоргстанкин-промиздат, 1996. – 120 с.
3. Гриднев, В.Н. Прочность и пластичность холоднодеформированной стали / В.Н. Гриднев, В.Г. Гаврилюк, Ю.Я. Мешков. – Киев: Наукова думка, 1974. – 231 с.
4. Губкин, С.И. Пластическая деформация металлов. Т. 1 / С.И. Губкин. – М.: Metallurgizdat, 1961. – 376 с.
5. Бэкофен, В. Процессы деформации / В. Бэкофен. – М.: Metallurgiya, 1977. – 288 с.
6. Avitzur, B. Metal forming. Processes and analysis / B. Avitzur. – New York, 1968. – P. 172.
7. Фетисов, В.П. Контроль пластичности высокопрочного состояния холоднодеформированной перлитной стали / В.П. Фетисов // Литье и металлургия. – 2024. – № 1. – С. 51–54.
8. Фетисов, В.П. Пластичность высокопрочной проволоки / В.П. Фетисов. – М.: Интернет Инжиниринг, 2011. – 128 с.
9. Mamoru, N. Suppression of delamination in hypereutectoid steel wires by multi skin-pass drawing / N. Mamoru, K. Takeshi // Tetsu-to-hagane. J. ISIS. – 2004. – Vol. 90, № 8. – P. 588–592.
10. Фетисов, В.П. Деформационное упрочнение углеродистой стали / В.П. Фетисов. М.: Мир, 2005. – 200 с.

REFERENCES

1. Perlin I.L., Ermanok M.Z. *Teoriya volocheniya* [The theory of drawing]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1971, 448 p.
2. Fetisov V.P. *Deformacionnoe starenie stali pri volochenii provoloki* [Deformational aging of steel during wire drawing]. Minsk. Belorgstankinpromizdat Publ., 1996, 120 p.
3. Gridnev V.N., Gavriluk V.G., Meshkov Ju. Ja. *Prochnost' i plastichnost' holodnodeformirovannoi stali* [Strength and ductility of cold-rolled steel]. Kiev, Naukova dumka Publ., 1974, 231 p.
4. Gubkin S.I. *Plasticheskaya deformaciya metallov. T. 1.* [Plastic deformation of metals. Vol. 1]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1961, 376 p.
5. Backofen W. *Processy deformacii* [A deformation processing]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1977, 288 p.
6. Avitzur B. *Metal forming. Processes and analysis*. New York, 1968, p.172.
7. Fetisov V.P. Kontrol' plastichnosti vysokoprochnogo sostoyaniya holodnodeformirovannoj perlitnoj stali [Control of plasticity of high-strength condition of cold-formed pearlitic steel]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2024, no. 1, pp. 51–54.
8. Fetisov V.P. *Plastichnost' vysokoprochnoj provoloki* [Ductility of high tensile wire]. Moscow, Internet Inzhiniring Publ., 2011, 128 p.
9. Mamoru N., Takeshi K. Suppression of delamination in hypereutectoid steel wires by multi skin-pass drawing. *Tetsu-to-hagane. J. ISIS*, 2004, vol. 90, no. 8, pp. 588–592.
10. Fetisov V.P. *Deformacionnoe uprochnenie uglerodistoj stali* [Carbon steel strain hardening]. Moscow, Mir Publ., 2005, 200 p.