



<https://doi.org/10.21122/1683-6065-2026-2-83-87>  
УДК 669

Поступила 14.04.2026  
Received 14.04.2026

## РАСЧЕТ ПОКАЗАТЕЛЕЙ НЕРАВНОМЕРНОСТИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ ПРИ ВОЛОЧЕНИИ ВЫСОКОПРОЧНОЙ ПЕРЛИТНОЙ СТАЛИ

В. П. ФЕТИСОВ, г. Орел, Российская Федерация. E-mail: [olga1560@yandex.ru](mailto:olga1560@yandex.ru)

При волочении высокопрочной перлитной стали деформационная неравномерность пластической деформации характеризуется опережением центральных слоев проволоки и подъемом металла на входе в рабочий конус волоки. Предложен расчетный метод контроля деформационной неравномерности с помощью эмпирических уравнений зависимостей: подъема металла на входе в волоку от прочности проволоки, величины единичного обжатия и конусности волоки; отношения опережения центральных слоев проволоки и подъема металла при изменении угла деформационной зоны волоки. Подъем металла повышается с увеличением прочности проволоки, единичных обжатий и конусности волоки. Аналогичное изменение характерно также для опережения центральных слоев высокопрочной проволоки, а при переходе к ультравысокопрочному состоянию отмечается увеличение опережения центральных слоев металла при уменьшении угла рабочего конуса волоки, связанное с возрастающим влиянием повышения контактной поверхности в очаге деформации на увеличение усилия волочения и растягивающих напряжений. Повышение равномерности пластической деформации при многократном волочении обеспечивается снижением на последних переходах в маршруте волочения: единичного обжатия и конусности волоки для высокопрочной проволоки и единичного обжатия для ультравысокопрочной проволоки. Расчетные значения показателей неравномерности деформации по сечению проволоки соответствуют экспериментальным результатам и подтверждаются контролем пластических свойств холоднодеформированной проволоки с повышенной прочностью.

**Ключевые слова.** Деформационная неравномерность процесса волочения, опережение при волочении центральных слоев проволоки, подъем металла на входе в рабочий конус волоки, эмпирические уравнения показателей неравномерности пластической деформации, влияние единичных обжатий и конусности волоки на снижение деформационной неравномерности.

**Для цитирования.** Фетисов, В. П. Расчет показателей неравномерности пластической деформации при волочении высокопрочной перлитной стали / В. П. Фетисов // Литие и металлургия. 2026. № 2. С. 83–87. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2026-2-83-87>.

## CALCULATION OF INDICATORS OF PLASTIC DEFORMATION NON-UNIFORMITY DURING DRAWING OF HIGH-STRENGTH PEARLITIC STEEL

V.P. FETISOV, Orel, Russian Federation. E-mail: [olga1560@yandex.ru](mailto:olga1560@yandex.ru)

During drawing of high-strength pearlitic steel, deformation-induced nonuniformity of plastic deformation is characterized by the lead of the wire central layers and metal rise at the entry to the die working cone. A calculation-based method is proposed for controlling deformation nonuniformity using empirical equations describing the dependences of metal rise at the die entry on wire strength, single reduction, and drawing tool cone angle, as well as the relationship between the lead of the wire central layers and metal rise when the die deformation zone angle changes. Metal rise increases with increasing wire strength, single reduction, and drawing tool cone angle. A similar trend is also characteristic of the lead of the central layers in high-strength wire. When transitioning to an ultra-high-strength state, an increase in the lead of the central metal layers is observed with a decrease in the die working cone angle, which is associated with the increasing effect of the larger contact surface area in the deformation zone on the growth of drawing force and tensile stresses. Improvement of plastic deformation uniformity during multiple drawing is ensured by decreasing, in the final passes of the drawing route, the single reduction and drawing tool cone angle for high-strength wire, and the single reduction for ultra-high-strength wire. The calculated values of deformation nonuniformity indicators across the wire cross section agree with experimental results and are confirmed by monitoring the plastic properties of cold-drawn high-strength wire.

**Keywords.** Plastic deformation nonuniformity in the drawing process. Lead of the wire central layers during drawing. Metal rise at the entry to the die working cone. Empirical equations for indicators of plastic deformation nonuniformity. Effect of single reduction and drawing tool cone angle on reducing deformation nonuniformity.

**For citation:** Fetisov V.P. Calculation of indicators of plastic deformation non-uniformity during drawing of high-strength pearlitic steel. Foundry production and metallurgy, 2026, no. 2, pp. 83–87. <https://doi.org/10.21122/1683-6065-2026-2-83-87>.

Современная тенденция повышения прочности холоднодеформированной проволоки из перлитной стали для металлокорда, рукавов высокого давления, канатной, пружинной и для армирования предварительно напряженных железобетонных конструкций сдерживается снижением пластичности металла в процессе деформации, которое ограничивает предельно допустимые суммарные обжатия, достижение высокого уровня прочности и промышленную реализацию полученного высокопрочного состояния. Поэтому обеспечение запаса пластичности высокопрочной проволоки имеет важное практическое значение.

Одним из значимых направлений повышения пластичности высокопрочной проволоки является уменьшение в процессе многократного волочения с большими суммарными обжатиями деформационной неравномерности пластической деформации.

Конусный очаг деформации и внешнее трение вызывают в процессе волочения перлитной стали опережение (Оп) центральных слоев проволоки [1] и подъем (П) металла на входе в рабочий конус проволоки [2], которые характеризуют неравномерность пластической деформации по сечению проволоки. При этом контроль показателей Оп и П осуществляется с помощью разъемных образцов проволоки [1] и волок [2]. Однако данный способ определения опережения центральных слоев проволоки и подъема металла весьма трудоемок и не может применяться для текущей разработки параметров процесса многократного волочения.

В настоящей статье предложена методика расчета показателей неравномерности пластической деформации по сечению проволоки с использованием следующих эмпирических уравнений для зависимостей: подъема металла от прочности проволоки ( $\sigma_B$ ), величины единичного обжатия ( $q$ ) и угла рабочего конуса проволоки ( $\beta$ ):

$$\text{П}(\%) = 0,005 \sigma_B (\text{кгс/мм}^2) + 0,02q(\%) + 0,11 \beta (\text{градус}) - 1,5, \quad (1)$$

отношения опережения центральных слоев и подъема металла при изменении конусности проволоки:

$$\text{Оп}(\text{мм}) / \text{П}(\%) = 0,600 - 0,025 \beta (\text{градус}). \quad (2)$$

Таблица 1. Параметры процесса волочения проволоки через разъемные волоки

Марка стали	Степень предварительной деформации, %	Временное сопротивление разрыву проволоки до волочения, Н/мм <sup>2</sup>	Угол рабочего конуса проволоки $\beta$ , град	Диаметр проволоки, мм			Степень единичной деформации, $\frac{d_0^2 - d_2^2}{d_0^2} \cdot 100\%$	Подъем металла на входе в очаг деформации, $\frac{d_1 - d_0}{d_1} \cdot 100\%$	Степень единичной деформации с учетом подъема металла, $\frac{d_1^2 - d_2^2}{d_1^2} \cdot 100\%$
				до волочения $d_0$	в начале зоны контактной деформации $d_1$	после волочения $d_2$			
80	0,0	1259,3	16°35'	6,20	6,30	5,17	30,5	1,58	32,6
	31,5	1548,4		6,20	6,31			1,74	
60	0,0	940,8	16°35'	6,20	6,29	5,17	30,5	1,43	32,4
	0,0	960,4		5,95	6,03			1,33	
70	0,0	1029,0	6°35'	4,79	4,80	4,15	24,9	0,208	25,3
	43,7	1430,8		4,80	4,82			0,415	
60	0,0	970,2	6°35'	5,0	5,02	4,15	31,1	0,40	31,7

Таблица 2. Влияние конусности проволоки и величины противонапряжения на опережение (мм) центральной зоны в проволоке диаметром 4,4 мм, протянутой с патентованной заготовки диаметром 5,2 мм из стали 60

Угол рабочего конуса проволоки $\beta$ , град	Усилия противонапряжения, Н		
	0	18% от разрывного усилия	36% от разрывного усилия
4	0,10	0,05	0,05
8	0,15	—	—
12	0,18	0,08	0,05
16	0,22	—	0,08

Выражение (1) получено [3] на базе экспериментальных данных, приведенных в табл. 1 [2], а выражение (2) – при обработке результатов исследований при волочении патентованной заготовки из стали 60 (табл. 1, 2) [1]:

1. Опережение центральной части проволоки (Оп, мм), диаметр заготовки 5,20 мм,  $q = 28,4\%$ :

$\beta = 8^\circ$ ;  $Оп_1 = 0,15$  мм;

$\beta = 16^\circ$ ;  $Оп_2 = 0,22$  мм.

2. Подъем металла ( $П$ ,%) на входе в волоку:

диаметр заготовки 5,0 мм;  $\beta = 6^\circ 35'$ ;  $q = 31,1\%$ ;  $П_1 = 0,40\%$ ;

диаметр заготовки 5,95 мм;  $\beta = 16^\circ 35'$ ;  $q = 24,5\%$ ;  $П_2 = 1,33\%$ .

3. Для сопоставимых условий (сочетание угла рабочего конуса волоки и единичного обжатия) повышение конусности волочильного инструмента сопровождается снижением отношения опережения центральных слоев и подъема металла ( $Оп_2/П_2 = 0,165$  против  $Оп_1/П_1 = 0,375$ ).

Таблица 3. Параметры процесса волочения патентированной заготовки диаметром 4,40 мм из стали 65 с использованием волок с  $\beta = 12^\circ$

Параметр	Диаметр проволоки по переходам в маршруте волочения, мм						
	4,40	4,05	3,55	3,10	2,75	2,45	2,20
Единичное обжатие $q$ , %	—	15,3	23,2	23,7	21,3	20,6	19,4
Временное сопротивление разрыву $\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup> (кгс/мм <sup>2</sup> )	989,8 (101,0)	1127,0 (115,0)	1259,3 (128,5)	1421,0 (145,0)	1553,3 (158,5)	1675,8 (171,0)	1783,6 (182,0)
Подъем металла $П$ , %	0,63	0,86	0,94	0,97	1,02	1,06	—
Опережение центральных слоев $Оп$ , мм	0,19	0,26	0,28	0,29	0,31	0,32	—

Таблица 4. Влияние прочности проволоки, величины единичного обжатия и угла рабочего конуса волочильного инструмента на показатели неравномерности пластической деформации

Марка стали	Сталь 65						Сталь 85					
	4,40		2,45		1,49		0,196		0,181			
Диаметр заготовки $d$ , мм	4,40		2,45		1,49		0,196		0,181			
Предварительное суммарное обжатие $Q_{пред}$ , %	0,0		69,0		0		98,3		98,5			
$\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup> (кгс/мм <sup>2</sup> )	989,8 (101,0)		1675,8 (171,0)		1303,0 (133,0)		3940,0 (402,0)		4082,7 (416,6)			
Единичное обжатие $q$ , %	15,3		19,4		5,0		12,5		14,6		3,3	
Угол рабочего конуса волоки $\beta$ , град	12	8	12	8	12	8	12	8	12	8	12	8
$П$ , %	0,63	0,19	1,06	0,62	0,77	0,33	0,73	0,29	2,12	1,68	1,97	1,53
$Оп$ , мм	0,19	0,08	0,32	0,25	0,23	0,13	0,22	0,12	0,64	0,67	0,59	0,61

В табл. 3, 4 приведены результаты расчетов показателей неравномерности пластической деформации, анализ которых показывает:

1. Хорошую сходимость расчетного и экспериментального значения опережения центральных слоев при волочении патентированного металла диаметром 4,40 мм, сталь 65,  $q = 15,3\%$  (табл. 3) и диаметром 5,20 мм, сталь 60,  $q = 28,4\%$  (табл. 2) с использованием волок с  $\beta = 12^\circ$  ( $Оп = 0,19$  мм против  $Оп = 0,18$  мм).

2. Увеличение в 1,68 раза опережения центральных слоев проволоки и подъема металла на входе в рабочий конус волоки после повышения предварительного суммарного обжатия при многократном волочении до  $Q_{пред} = 69\%$  (см. табл. 3).

3. Для высокой прочности проволоки в области больших суммарных обжатий (диаметр 2,45 мм,  $Q_{пред} = 69\%$ ,  $\sigma_B = 1675,8$  Н/мм<sup>2</sup>):

$П$ (%) и  $Оп$  (мм) повышаются по сравнению с патентированной заготовкой и при увеличении  $\beta$  с 8 до 12°;

снижение единичного обжатия с 19,4 до 5,0% уменьшает  $П$  (%) и  $Оп$  (мм) независимо от конусности волоки.

4. Для ультравысокой прочности проволоки в области сверхбольших суммарных обжатий (диаметр 0,196 и 0,181 мм,  $Q_{пред} 98,3$  и 98,5%,  $\sigma_B 3940,0$  и 4082,7 Н/мм<sup>2</sup>):

$П$ (%) повышается по сравнению с патентированным исходным состоянием при увеличении угла рабочего конуса волочильного инструмента с 8 до 12° и  $q$  с 3,3 до 14,6%;

$Оп$  (мм) увеличивается по сравнению с патентированной заготовкой при повышении единичного обжатия с 3,3 до 14,6% и при снижении конусности волоки с 12 до 8°;

рост Оп(мм) при уменьшении угла рабочего конуса волокна для  $q$  3,3 и 14,6%, причем в большей степени с увеличением единичного обжатия.

Отмеченное для ультравысокопрочного состояния разнонаправленное изменение показателей Оп и П при уменьшении угла рабочего конуса волокна (увеличение Оп и снижение П) связано с возрастающим влиянием повышения контактной поверхности в очаге деформации на увеличение усилия волочения и растягивающих напряжений, дополнительная величина которых при росте Оп способствует нарушению сплошности металла в центральной части проволоки [4].

Проведенное рассмотрение формирования показателей Оп и П показывает, что для повышения равномерности пластической деформации по сечению проволоки необходимо на последних переходах многократного волочения снижать единичное обжатие и конусность волокна для высокопрочной проволоки и единичное обжатие для ультравысокопрочной проволоки. При этом расчетные значения показателей, характерные для более равномерной пластической деформации при многократном волочении, подтверждаются результатами контроля пластических свойств холоднодеформированной проволоки с повышенной прочностью, в частности, при уменьшении единичного обжатия на чистовом переходе в маршруте волочения [2, 5]. Так, для латунированной проволоки диаметром 0,178 мм из стали 90 при волочении с единичным обжатием  $q = 12,2\%$  на предчистовом переходе ( $Q_{\text{пред}} = 98,5\%$ ,  $\sigma_B = 4106 \text{ Н/мм}^2$ , относительное удлинение на базе 200 мм  $\delta_{200} = 0,73\%$ , число переменных скручиваний  $m = 13$ ) снижение степени деформации до  $q = 3,3\%$  на заключительном переходе многократного волочения вызывает при конусности волочильного инструмента  $\beta = 12^\circ$  следующие изменения механических свойств проволоки диаметром 0,175 мм:  $\sigma_B = 4040 \text{ Н/мм}^2$ ,  $\delta_{200} = 1,09\%$ ,  $m = 64$ . Увеличение пластичности ультравысокопрочной проволоки для металлокорда при уменьшении единичного обжатия на чистовом переходе составило: в 1,5 раза для относительного удлинения и в 4,9 раза для переменных скручиваний, являющихся наиболее чувствительной характеристикой к внутренним и поверхностным дефектам холоднодеформированного металла [2], что обусловлено снижением при волочении растягивающих напряжений, предопределяющим уменьшение опережения центральных слоев проволоки, и соответствующим ростом сжимающих напряжений в схеме деформации. Поэтому расчет опережения центральных слоев проволоки, характеризующего пластичность холоднодеформированного металла, должен стать необходимой составляющей технологии волочения проволоки с повышенной прочностью.

### Выводы

1. Предложены эмпирические уравнения для расчета опережения центральных слоев проволоки и подъема металла на входе в рабочий конус волокна при волочении высокопрочной перлитной стали, обеспечивающие хорошее соответствие с экспериментальными результатами.
2. Подъем металла повышается для высокопрочной и ультравысокопрочной проволоки с увеличением прочности, единичных обжатий и конусности волочильного инструмента.
3. Опережение центральных слоев проволоки повышается при увеличении прочности и единичных обжатий для высокопрочного и ультравысокопрочного состояния. Уменьшение угла рабочего конуса волокна снижает опережение центральных слоев для высокопрочной проволоки и повышает для ультравысокопрочной проволоки.
4. Ультравысокопрочное состояние сопровождается повышением опережения центральных слоев проволоки при уменьшении конусности волочильного инструмента за счет дополнительного прироста усилия волочения и растягивающих напряжений при увеличении контактной поверхности в очаге деформации.
5. Повышение равномерности пластической деформации при многократном волочении обеспечивается снижением на последних переходах в маршруте волочения: единичного обжатия и конусности волочильного инструмента для высокопрочной проволоки и единичного обжатия для ультравысокопрочной проволоки.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Мартин, М. Влияние противонапряжения при волочении стальной проволоки на ее свойства и процесс волочения / М. Мартин, Г. Кох, Ф. Фишер // Черные металлы. – 1961. – № 6. – С. 18–27.
2. Фетисов, В.П. Деформационное старение стали при волочении проволоки / В.П. Фетисов. – Минск: Белоргстанкинромиздат, 1966. – 120 с.
3. 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.

4. Перлин, И.Л. Теория волочения / И.Л. Перлин, М.З. Ерманок. – М.: Metallurgiya, 1971. – 448 с.
5. Фетисов, В.П. Пластичность высокопрочной проволоки / В.П. Фетисов. – М.: Интернет Инжиниринг, 2011. – 128 с.

#### REFERENCES

1. **Martin M., Koch G., Fischer F.** Vliyaniye protivonatyazheniya pri volochenii stal'noj provoloki na yeyo svoistva i process volocheniya [The influence of back tension during of steel wire on its properties and the drawing process]. *Cherneye metally = Ferrous metals*, 1961, no.6, pp.18–27.
2. **Fetisov V.P.** *Deformacionnoe starenie stali pri volochenii provoloki* [Deformation aging of steel during wire drawing]. Minsk, Belorgstankinpromizdat Publ., 1996. 120 p.
3. **Fetisov V.P.** Ocenka neravnomernosti plasticheskoy deformacii pri volochenii vysokoprochnoj provoloki iz perlitnoj stali [Assessment of the unevenness of plastic deformation in drawing high-strength pearlite steel wire]. *Lit'e i metallurgiya = Foundry production and metallurgy*, 2025, no.3, pp. 56–60.
4. **Perlin I.L., Ermanok M.Z.** *Teoriya volocheniya* [Drawing theory]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1971. 448 p.
5. **Fetisov V.P.** *Plastichnost' vysokoprochnoj provoloki* [Ductility of high tensile wire]. Moscow, Internet Inzhiniring Publ., 2011, 128 p.