

УДК 621.778.073

## ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ДЕФОРМАЦИИ НА СОПРОТИВЛЕНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОМУ ДЕФОРМИРОВАНИЮ УГЛЕРОДИСТОЙ ЛАТУНИРОВАННОЙ ПРОВОЛОКИ В ПРОЦЕССЕ ТОНКОГО ВОЛОЧЕНИЯ

**С. В. АВСЕЙКОВ, Ю. Л. БОБАРИКИН**

*Учреждение образования «Гомельский государственный  
технический университет имени П. О. Сухого»,  
Республика Беларусь*

Углеродистая латунированная проволока используется в производстве автомобильных шин, рукавов высокого давления. Она служит армирующим элементом для резиновой составляющей шин или рукавов высокого давления. Проволока часто свивается в металлокорд для усиления армирующего эффекта. Проволоку получают из проволоочной заготовки методом тонкого волочения.

Современное производство углеродистой латунированной проволоки развивается в направлении повышения прочности металла проволоки. Для этих целей в металле повышают концентрацию углерода или повышают степень упрочняющей деформации проволоки при волочении. К тому же в целях повышения эффективности производства постоянно наращиваются скорости волочения, напрямую определяющие производительность процесса волочения. Повышение скорости волочения сопровождается ростом температуры проволоки в процессе деформации, что усиливает упрочнение проволоки за счет эффекта динамического деформационного старения.

Таким образом, повышение степени деформации проволоки и увеличение скорости ее волочения влекут за собой повышение прочности и, как следствие, снижение пластичности проволоки. Но пластические свойства проволоки используются при дальнейшей ее свивке в металлокорд, они обеспечивают и эксплуатационные характеристики шин и рукавов высокого давления. Степень деформации и скорости волочения проволоки определяются одним показателем – скоростью деформации.

В этой связи возникает задача прогноза пластических свойств проволоки в зависимости от ее скорости деформации.

На скорость деформации проволоки при волочении влияют скорость волочения, частная вытяжка и угол конической части волюки. Средняя скорость деформации в волюке в зависимости от вышеперечисленных параметров может быть рассчитана по предложенной Колмогоровым Г. Л. зависимости [1]:

$$\dot{\epsilon}_p = \frac{4(\ln \sqrt{\mu} + 0,385 \cdot \operatorname{tg}(\alpha_b)) V_b \cdot \operatorname{tg}(\alpha_b)}{d_i (\sqrt{\mu} - 1) \sqrt{\mu}}, \quad (1)$$

где  $V_b$  – скорость волочения, мм/с;  $d_i$  – диаметр волюки, мм;  $\alpha_b$  – угол конической части волюки;  $\mu$  – частная вытяжка.

Влияние скорости деформации на сопротивление пластическому деформированию в процессе волочения рассматривается через отношение динамического условного предела текучести материала к статическому пределу текучести [2]:

$$S_{\sigma} = \frac{\sigma_d}{\sigma_{ст}}, \quad (2)$$

где  $\sigma_d$  – динамический условный предел текучести, значение которого зависит от скорости деформации, МПа;  $\sigma_{ст}$  – статический условный предел текучести, величина которого условно принята не зависящей от скорости деформирования, МПа.

Полученные значения  $S_{\sigma}$  для исследуемого материала аппроксимируются функцией, которая описывает влияние скорости деформации на расчетное значение условного предела текучести модели материала и имеет вид [3]:

$$\frac{\sigma_d}{\sigma_{ст}} = 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{p}}, \quad (3)$$

где  $\dot{\epsilon}$  – скорость деформации,  $c^{-1}$ ;  $C$  и  $p$  – параметры материала.

Среднюю скорость деформации в конической зоне волокна можно определить с помощью численного моделирования процесса волочения проволоки [3]. Главным преимуществом способа численного моделирования является отражение характера распределения скорости деформации в конической зоне волокна. Распределение скорости деформации в конической зоне волокна влияет не только на значение условного предела текучести, но и на остаточное напряжение в проволоке после волочения и на силовые параметры процесса волочения.

Испытания на осевое растяжение углеродистой латунированной проволоки проводились по стандартной методике [4]. Для определения условного предела текучести рекомендуется использовать проволоку с рабочей длиной между зажимами  $l_p = 50$  мм и скоростью растяжения  $V_p = 60$  мм/мин. Такие условия соответствуют скорости деформации  $1,1 c^{-1}$ . В ходе испытаний на осевое растяжение варьировались рабочая длина проволоки  $l_p$  и скорость растяжения  $V_p$  (табл. 1). Испытания на осевое растяжение проводилось на разрывной машине INSTRON 5969. В ходе испытаний было установлено, что, уменьшая скорость деформации (в зависимости от скорости растяжения и длины рабочей зоны растягиваемой проволоки), уменьшаются значения условного предела текучести (табл. 1).

Таблица 1

**Механические свойства тонкой проволоки 0,30 мм  
при различных скоростях растяжения**

Механические параметры	Скорость растяжения, мм/мин (длина рабочей части проволоки, мм)			
	60 (50)	560 (100)	310 (100)	60 (100)
Скорость деформации $\dot{\epsilon}$ , $c^{-1}$	1,1	0,058	0,033	0,0078
Условный предел текучести $\sigma_v$ , МПа	3142,67	2733,10	2382,96	2115,31
Предел прочности $\sigma_b$ , МПа	3327,33	3274,59	3279,18	3283,13

Из табл. 1 видно, что уменьшение скорости деформации при осевом испытании проволоки с  $1,1$  до  $0,0078 c^{-1}$  снижает значения условного предела текучести на 48,56 %, а предела прочности на 1,3 %. Из этого следует вывод, что изменение скорости деформации не влияет на значение предела прочности проволоки при растяжении.

Значения скорости деформации при осевом растяжении и в процессе волочения отличаются более чем в 1000 раз. В последней (чистой) волоке проволока протягивается с максимальной скоростью волочения и как следствие с максимальной скоростью деформации, что значительно повышает значение условного предела текучести. Поэтому при последующем растяжении такой проволоки определить статический предел текучести даже с минимальной скоростью растяжения не представляется возможным.

Для определения статического условного предела текучести проведено волочение проволоки с минимальной скоростью волочения  $V_b = 0,8$  м/с и дальнейшее ее осевое растяжение (табл. 2). Длина рабочей части проволоки при растяжении составляла 400 мм, что при скорости растяжения  $V_p = 60$  мм/мин соответствует скорости деформации  $\dot{\epsilon} = 0,0025$  с<sup>-1</sup>. Значение условного предела текучести тонкой проволоки в этих условия будем считать не зависящим от скорости деформации, т. е. статическим.

Таблица 2

**Механические свойства тонкой проволоки с различными скоростями волочения**

Скорость волочения $V_b$ , м/с	Средняя скорость деформации при волочении в чистой волоке $\dot{\epsilon}$ , с <sup>-1</sup>	Модуль упругости $E$ , ГПа		Условный предел текучести $\sigma_y$ , МПа		Напряжение при разрыве $\sigma_b$ , МПа		$\sigma_y/\sigma_b$	Деформация при разрыве $\epsilon_{max}$ , %	
		$X_{cp}^*$	$S^{**}$	$X_{cp}$	$S$	$X_{cp}$	$S$		$X_{cp}$	$S$
16	34610	189	5,56	3143	44,14	3327	4,67	0,94	2,36	0,093
0,8	1730	154	9,61	1821	70,64	3327	8,28	0,55	4,01	0,18

\*  $X_{cp}$  – среднее значение выборки,  $X_{cp} = (\sum X_i)/n$ , где  $X_i$  – значение параметра;  $n$  – количество повторов.

\*\*  $S$  – стандартная ошибка среднего, является оценкой расхождения совокупности и определяется как  $S = \sqrt{\frac{\sum (X_i - X_{cp})^2}{n - 1}}$ .

Модуль упругости  $E$  и условный предел текучести  $\sigma_y$  определены непосредственно из диаграмм растяжения. Зависимость сопротивления пластическому деформированию латунированной проволоки от деформации определяли аппроксимацией экспериментальных данных, полученных при осевом растяжении проволоочной заготовки и тонкой проволоки.

Анализ табл. 2 показывает, что при протяжке на пониженной скорости волочения улучшаются пластические свойства тонкой проволоки (условный предел текучести и деформация при разрыве). Это обусловлено снижением скорости деформации в конце маршрута волочения.

Основными способами снижения скорости деформации в процессе волочения являются: снижение скорости волочения, уменьшение угла конической части волоки, уменьшение частной вытяжки.

Снижение скорости волочения уменьшает производительность волочильного стана, уменьшение частных вытяжек увеличивает общее количество волок в маршруте волочения.

Уменьшение угла конической части волоки способствует росту силы волочения за счет увеличения поверхности контакта проволоки с волокой. С другой стороны, уменьшение угла конической части волоки способствует улучшению захвата смазки.

На основании средних значений скорости деформации, определяемых численным моделированием процесса тонкого волочения, и выражая из зависимости (3) значения динамического предела текучести  $\sigma_d$  представляется возможным определить зависимость динамического предела текучести  $\sigma_d$  от скорости деформации тонкой латунированной проволоки.

Для этого был проведен численный эксперимент по определению средней скорости деформации в очаге деформации чистовой волоки при изменении угла конической зоны волоки. Исходным материалом для численного моделирования процесса волочения использовалась латунированная углеродистая проволочная заготовка, содержащая 0,82–0,84 % углерода. Проволочная заготовка протягивается в многократном волочильном стане со скольжением с диаметра 1,77 мм до диаметра 0,30 мм со скоростью волочения ( $V_B$ ) на выходе из стана 16 м/с.

Результаты численного эксперимента представлены в табл. 3.

Таблица 3

## Результаты численного эксперимента

Угол конической зоны волоки $\alpha$ , °	Средняя скорость деформации $\dot{\epsilon}_{cp}$ , с <sup>-1</sup>		Максимальная скорость деформации $\dot{\epsilon}_{max}$ , с <sup>-1</sup>	Усилие волочения $F_B$ , Н	Температура поверхности проволоки $T_{п.п.}$ , °С
	Численный эксперимент	Зависимость Колмогорова Г. Л.			
4	25830	19972	53200	67,41	680,0
5	31940	26989	65780	64,13	673,4
6	32310	34760	67650	62,64	670,8
7	34910	43578	76770	62,33	663,6
8	39420	53233	86570	61,05	657,8

Анализ табл. 3 показывает, что снижение угла конической зоны волоки ( $\alpha$ ) на 2° (по сравнению с применяемыми в промышленных условия волоками, в которых угол конической зоны ( $\alpha$ ) равен 6°) позволяет добиться снижения средней скорости деформации на 25 %. С другой стороны, уменьшение угла конической зоны волоки до 4° незначительно влияет на параметры процесса волочения: повышает усилие волочения на 7,61 % и увеличивает температуру поверхности проволоки на 2 % по сравнению с используемыми в технологическом процессе волоками.

Анализ средних значений скорости деформации полученных численным моделированием и рассчитанных по зависимости (1) показывает, что минимальное расхождение значений скорости деформации обеспечивается в диапазоне до 35000 с<sup>-1</sup>. Это ограничивает применение зависимости (1) в решении оптимизационных задач процессов высокоскоростного волочения. Использование численного моделирования для решения оптимизационных задач высокоскоростного волочения высокопрочной углеродистой проволоки предпочтительно. Результаты численного моделирования позволяют определять численные значения средней и максимальной скорости деформации тонкой проволоки и получать графические изображения распределения численных значений скорости деформации в очаге деформации волоки в виде цветокодированных полей.

На рис. 1 представлены цветокодированные поля распределения скорости деформации в конической зоне последней (чистой) волоки маршрута волочения тонкой проволоки 0,30 НТ при скорости волочения  $V_B = 16$  м/с. На рисунках направление волочения сверху вниз и показана одна симметричная половина зоны деформации, где ось  $X$  – ось симметрии.

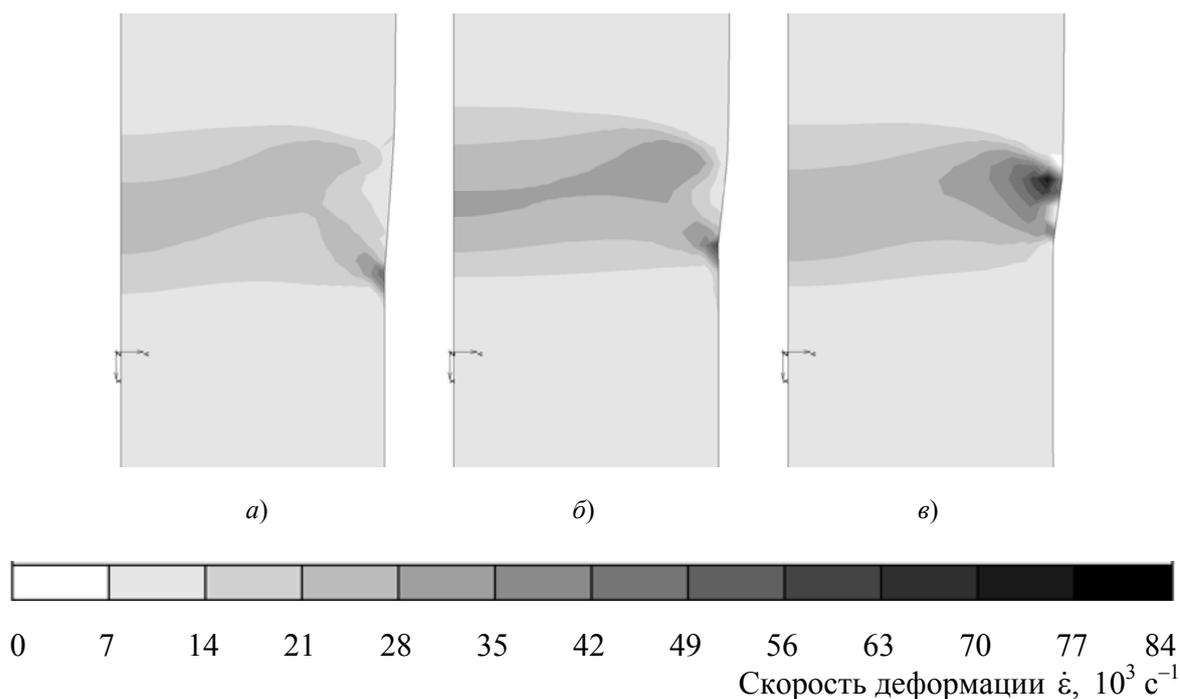


Рис. 1. Поля распределения скоростей деформации в зависимости от угла конической части волокна: а –  $\alpha = 4^\circ$ ; б –  $\alpha = 6^\circ$ ; в –  $\alpha = 8^\circ$

Анализ полей распределения скоростей деформации в зависимости от угла конической зоны показывает, что с увеличением угла деформация проволоки происходит преимущественно в поверхностных слоях. Это приводит к тому, что поверхностные слои упрочняются больше по сравнению с центральными. Это объясняет то, что при испытаниях на растяжение проволоки, полученной при разных скоростях волочения, наблюдается рост условного предела текучести с увеличением скорости деформации при волочении. В этой связи при увеличении скорости волочения важно знать не только значение скорости деформации, но и характер ее распределения, так как именно распределение скорости деформации в конической зоне волокна формирует равномерность напряженно-деформированного состояния по сечению проволоки.

Аппроксимацией значений динамического ( $\sigma_d$ ) и статического ( $\sigma_{ст}$ ) предела текучести в зависимости от средней скорости деформации ( $\dot{\epsilon}_{ср}$ ) в конической зоне проволоки, полученных при протяжке тонкой проволоки с различными скоростями волочения (табл. 2) зависимостью (3), получена зависимость, представленная на рис. 2.

Анализ зависимости на рис. 2 показывает, что средняя скорость деформации ( $\dot{\epsilon}_{ср}$ ) проволоки возрастает пропорционально росту скорости волочения ( $V_B$ ) проволоки в маршруте волочения. Уменьшение угла конической зоны чистовой проволоки ( $\alpha$ ) на  $2^\circ$  позволяет снизить скорость деформации ( $\dot{\epsilon}_{ср}$ ) и понизить сопротивление пластическому деформированию тонкой проволоки (динамический предел текучести  $\sigma_d$ ) на 6 %. Для достижения снижения сопротивления пластическому деформированию ( $\sigma_d$ ) тонкой проволоки в зависимости от скорости деформации ( $\dot{\epsilon}_{ср}$ ) более чем на 6 % необходимо уменьшать угол конической зоны ( $\alpha$ ) в волокнах с конца маршрута волочения. Количество волокон определяется в зависимости от необходимого значения сопротивления пластическому деформированию тонкой проволоки. Например: необходимо получить  $\sigma_d = 2535 \text{ МПа}$  (снижение на 24 %), тогда если использование

одной волокой с углом конической зоны  $\alpha = 4^\circ$  позволяет снизить  $\sigma_d$  на 6 %, то для уменьшения  $\sigma_d$  на 24 % необходимо использовать 4 последние волокна с уменьшенным углом  $\alpha$ .

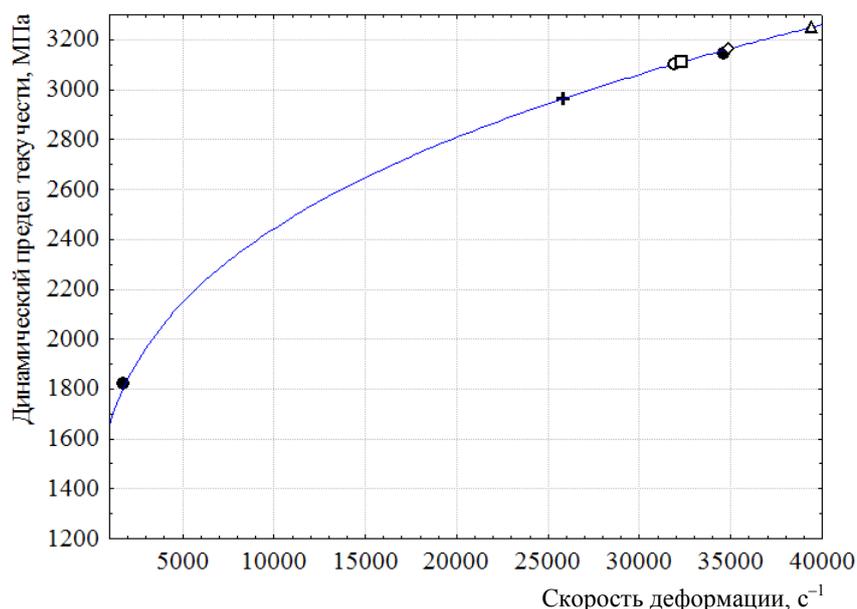


Рис. 2. Влияние угла конической зоны волокна на динамический предел текучести:  
 ● – опытные значения (табл. 2); +, ◯, ◻, ◊, Δ – значения численного эксперимента при различных углах конической зоны волокна  $\alpha$ :  
 «+» –  $4^\circ$ ; «◯» –  $5^\circ$ ; «◻» –  $6^\circ$ ; «◊» –  $7^\circ$ ; «Δ» –  $8^\circ$

Зависимость 3 позволила определить сопротивление пластическому деформированию ( $\sigma_d$ ) в зависимости от средней скорости деформации ( $\dot{\epsilon}_{cp}$ ) тонкой проволоки 0,30 НТ:

$$\sigma_d = \left[ 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}}{C} \right)^{\frac{1}{p}} \right] \sigma_{ст}, \quad (4)$$

где  $\dot{\epsilon}$  – скорость деформации в процессе волочения, с<sup>-1</sup>;  $C$  – средняя скорость деформации при определении  $\sigma_{ст}$ ,  $C = 1500^{-1}$ ;  $p$  – параметр материала проволоки,  $p = 3,3$ ;  $\sigma_{ст}$  – условный предел текучести в начале маршрута волочения тонкой проволоки,  $\sigma_{ст} = 880$  МПа.

В результате проведенных исследований было определено:

1. Средняя скорость деформации в процессе осевого растяжения и в процессе тонкого волочения влияет на значение условного предела текучести тонкой проволоки и не влияет на предел прочности.

2. Использование численного моделирования позволяет определять более точные значения средней и максимальной скоростей деформации в очаге деформации по сравнению с известными зависимостями. Полученные с помощью численного моделирования поля распределения скорости деформации позволяют объяснить увеличение сопротивления пластического деформирования с ростом скорости деформации в процессе волочения.

3. Получена зависимость изменения сопротивления пластическому деформированию в процессе волочения от средней скорости деформации в очаге деформации по всему маршруту волочения тонкой проволоки 0,30 НТ.

4. Использование волок с уменьшенным углом конической зоны снижает сопротивление пластическому деформированию тонкой проволоки. Управление значением сопротивления пластического деформирования тонкой проволоки возможно установкой необходимого количества волок с уменьшенным углом конической зоны.

### Литература

1. Колмогоров, Г. Л. О скорости деформации при волочении / Г. Л. Колмогоров, В. Б. Филиппов, Е. В. Кузнецова // Изв. высш. учеб. заведений. Черная металлургия. – 2005. – № 8. – С. 17–19.
2. HU Yu-qun. Scale effect of plastic strain rate / YU-qun HU, ZHAO Ya-pu // Chinese journal of aeronautics. – 2001. – Vol. 14, № 1. – P. 37–43.
3. Бобарикин, Ю. Л. Математическое описание формирования пластических свойств проволоки из стали 90 при высокоскоростном волочении / Ю. Л. Бобарикин, С. В. Авсейков // Литье и металлургия. – 2011. – № 3. – С. 61–65.
4. ASTM A 370-07a. Стандартные методы испытаний и определения для механического испытания стальной продукции.

*Получено 08.02.2013 г.*