

## ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ВОЛОЧЕНИЯ НА ПЛАСТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ТОНКОЙ УГЛЕРОДИСТОЙ ЛАТУНИРОВАННОЙ ПРОВОЛОКИ

УО «Гомельский государственный технический университет  
им. П.О. Сухого»  
г. Гомель, Беларусь

*Определены основные параметры режимов волочения, влияющие на механические характеристики тонкой проволоки. Определены зависимости изменения механических характеристик тонкой углеродистой проволоки на режимы волочения.*

*Достигнута возможность разработки схем волочения для предсказания изменения пластических характеристик тонкой проволоки.*

*Key parameters of regimes the drawings influencing change of mechanical characteristics of a thin wire at drawing are defined. Dependences of change of mechanical characteristics of a thin carbonaceous wire on regimes of its drawing are defined.*

*Possibility is attained by working out of itineraries of drawing to predict change of plastic characteristics of a thin wire.*

Тонкое волочение стальной углеродистой латунированной проволоки позволяет получать тонкую проволоку диаметром 0,15–0,7 мм с высокой прочностью 3–4 ГПа. Получаемая проволока используется в производстве рукавов высокого давления, металлокорда в шинной промышленности. К проволоке предъявляются жесткие технические требования по прочностным, пластическим и технологическим свойствам. Особый интерес представляют пластические свойства тонкой проволоки влияющие на качественные характеристики тонкой проволоки и проволочных изделий. Эти свойства зависят от механических свойств исходной проволочной термичеки разупрочненной латунированной заготовки диаметром в диапазоне 1,5–2,5 мм и от режимов волочения этой заготовки до диаметра тонкой проволоки на волочильном стане тонкого (мокрого) волочения. На практике пластические свойства тонкой проволоки зависят от

свойств проволочной заготовки и режимов ее волочения и не прогнозируются расчетным способом. Расчетным способом прогнозируется только прочность тонкой проволоки. Это затрудняет освоение производства новых видов продукции с заданными пластичными свойствами. Количественная оценка влияния режимов волочения проволоки на ее пластические свойства после волочения имеет существенное практическое значение. Оно состоит в возможности прогнозировать конкретные значения механических свойств проволоки в широком диапазоне посредством назначения расчетных режимов волочения этой проволоки.

В известных источниках авторам не удалось выявить информацию, описывающую количественную связь между пластическими свойствами тонкой проволоки и режимами ее волочения.

К основным механическим характеристикам проволоки относят следующие параметры: условный предел текучести  $\sigma_y$ , предел прочности  $\sigma_b$ , соотношение условного предела текучести и предела прочности  $\sigma_y/\sigma_b$ , относительное удлинение при разрыве  $A_5$ , модуль упругости  $E$ .

Известно, что волочение сопровождается упрочнением, которое повышает значения  $\sigma_y$ ,  $\sigma_b$ ,  $\sigma_y/\sigma_b$ , уменьшает  $A_5$ , почти не изменяет  $E$ . Отношение  $\sigma_y/\sigma_b$  и значение  $A_5$  характеризуют пластические свойства тонкой проволоки. Величины  $\sigma_y$ ,  $\sigma_b$  характеризуют прочностные свойства тонкой проволоки.

В производстве основной характеристикой тонкой проволоки, влияющей на выбор маршрута волочения или на деформационный режим волочения, является  $\sigma_b$ . То есть маршрут волочения рассчитывается с целью получения заданного диаметра тонкой проволоки и ее предела прочности. А пластические параметры формируются не прогнозируемо под действием режимов волочения. Но, на эксплуатационные свойства тонкой проволоки комплексно влияют все выше перечисленные ее характеристики.

Целью исследования являлась количественная оценка влияния режимов тонкого волочения стальной углеродистой латунированной проволоки на станах тонкого волочения, работающих по принципу скольжения проволоки по поверхности тяговых шайб стана, на формирование пластических характеристик тонкой проволоки в процессе тонкого волочения.

Объектом исследований являлся процесс тонкого волочения тонкой стальной латунированной проволоки. Предмет исследований — пластические характеристики тонкой стальной латунированной проволоки, режимы волочения данной проволоки на волочильных станах тонкого волочения и связь между режимами волочения проволоки и ее пластическими свойствами после волочения.

Методика исследований состояла в статистическом анализе данных, полученных в условиях промышленного производства проволоки и полученных в результате теоретических расчетов параметров волочения, которые было невозможно получить в промышленных условиях.

Для исключения возможного влияния масштабного фактора маршрута волочения для анализа данных соотношений выбирали по равенству диаметров тонкой проволоки ( $d$ ). В маршрутах тонкого волочения варьировались: диаметры проволочной заготовки ( $D$ ), суммарная логарифмическая степень деформации проволоки ( $\epsilon$ ), кинематические параметры режимов волочения (максимальная скорость волочения в волочильном стане  $V$ ) (рис. 1), и температура волочения ( $T$ ) (рис. 2).

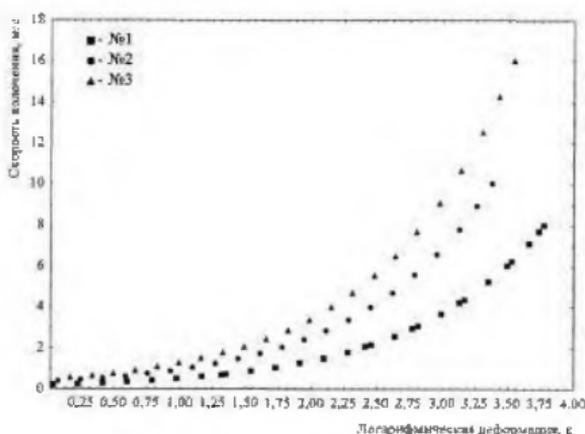


Рис. 1. Изменение скорости волочения проволоки в исследуемых маршрутах волочения

В маршруте волочения №1 используется проволочная заготовка диаметром  $D = 1,98$  мм и протягивается за 28 проходов до диаметра готовой тонкой проволоки  $d = 0,30$  мм со скоростью на выходе из волочильного стана  $V_* = 8$  м/с.

В маршруте волочения №2 используется проволочная заготовка диаметром  $D = 1,90$  мм и протягивается за 22 прохода до диаметра готовой тонкой проволоки  $d = 0,30$  мм со скоростью на выходе из волочильного стана  $V_* = 10$  м/с.

В маршруте волочения №3 используется проволочная заготовка диаметром  $D = 1,77$  мм и протягивается за 28 проходов до диаметра готовой тонкой проволоки  $d = 0,30$  мм со скоростью на выходе из волочильного стана  $V_* = 8$  м/с (табл. 1).

Графическая интерпретация изменения скорости волочения в зависимости от логарифмической степени деформации в исследуемых маршрутах волочения представлена на рис. 1.

Графическая интерпретация изменения температуры поверхности проволоки от логарифмической степени деформации в исследуемых маршрутах волочения представлена на рис. 2.

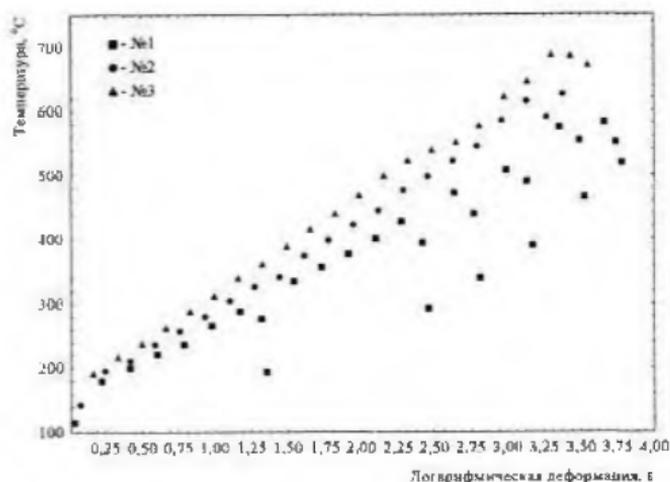


Рис. 2. Изменение температуры поверхности проволоки в исследуемых маршрутах волочения

Табл. 1

## Параметры исследуемых маршрутов волочения

№ во- до- жи	Маршрут волочения								
	№ 1			№ 2			№ 3		
	$d$	$\varepsilon$	$V_s$	$d$	$\varepsilon$	$V_s$	$d$	$\varepsilon$	$V_s$
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0	1,98	0,00	0,00	1,9	0,00	0,34	1,77	0,00	0,00
1	1,945	0,04	0,19	1,83	0,08	0,37	1,629	0,17	0,54
2	1,77	0,22	0,23	1,68	0,25	0,43	1,499	0,33	0,64
3	1,61	0,41	0,28	1,543	0,42	0,52	1,38	0,50	0,76
4	1,465	0,60	0,33	1,417	0,59	0,61	1,27	0,66	0,89
5	1,335	0,79	0,40	1,301	0,76	0,72	1,169	0,83	1,05
6	1,214	0,98	0,49	1,195	0,93	0,86	1,076	1,00	1,24
7	1,104	1,17	0,59	1,097	1,10	1,02	0,99	1,16	1,47
8	1,025	1,32	0,68	1,007	1,27	1,21	0,912	1,33	1,73
9	1,006	1,35	0,71	0,924	1,44	1,44	0,839	1,49	2,05
10	0,916	1,54	0,85	0,849	1,61	1,70	0,773	1,66	2,41
11	0,834	1,73	1,03	0,78	1,78	2,01	0,711	1,82	2,85
12	0,76	1,92	1,24	0,717	1,95	2,38	0,655	1,99	3,36
13	0,693	2,10	1,49	0,659	2,12	2,82	0,603	2,15	3,96
14	0,633	2,28	1,79	0,605	2,29	3,35	0,555	2,32	4,68
15	0,591	2,42	2,05	0,556	2,46	3,96	0,511	2,48	5,52
16	0,579	2,46	2,13	0,511	2,63	4,69	0,471	2,65	6,49
17	0,529	2,64	2,56	0,47	2,79	5,55	0,434	2,81	7,65
18	0,494	2,78	2,93	0,432	2,96	6,56	0,399	2,98	9,05
19	0,484	2,82	3,05	0,397	3,13	7,77	0,368	3,14	10,63
20	0,443	2,99	3,64	0,371	3,27	8,90	0,339	3,31	12,53
21	0,413	3,13	4,19	0,35	3,38	10,00	0,318	3,43	14,24
22	0,405	3,17	4,36				0,3	3,55	16,00
23	0,37	3,35	5,22						
24	0,345	3,49	6,01						
25	0,339	3,53	6,22						

\* Оконч. табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
26	0,317	3,66	7,12						
27	0,305	3,74	7,69						
28	0,300	3,78	8,00						

Примечание:

 $d$  — диаметр проволоки, мм; $\varepsilon$  — суммарная логарифмическая деформация проволоки; $V_{\max}$  — максимальная скорость волочения, м/с;

Из рис. 2 видно, что температура поверхности проволоки в процессе волочения изменяется в широком диапазоне от 100 до 680 °С. Снижение температуры проволоки при волочении позволяет повысить пластические свойства тонкой проволоки после волочения вследствие снижения степени деформационного старения металла проволоки [1]. Поэтому целесообразно принять максимальную температуру поверхности проволоки в маршруте волочения за качественный параметр маршрутов волочения (табл. 2). То есть, чем ниже максимальная температура поверхности проволоки в маршруте волочения при фиксированной скорости волочения, тем выше пластические свойства тонкой проволоки. Температура проволоки при волочении определялась численным моделированием с использованием метода конечных элементов, на основании зависимостей механики деформируемого твердого тела и теории пластичности [2]. В табл. 2 представлены основные параметры исследуемых маршрутов волочения.

Табл. 2

Основные параметры маршрутов волочения

Маршрут волочения, №	$\varepsilon$	$V_{\max}$	$T$
1	3,75	8	581,3
2	3,37	10	624,7
3	3,54	16	686,1

Примечание:

 $\varepsilon$  — суммарная логарифмическая деформация тонкой проволоки; $V_{\max}$  — максимальная скорость волочения, м/с; $T$  — максимальная температура поверхности проволоки в маршруте волочения, °С.

Для исследования отбирались образцы проволочной заготовки и готовой тонкой проволоки из действующего производства из маршрутов волочения №1, 2, 3 (табл. 1). Образцы изготавливались из проволочной заготовки и тонкой проволоки согласно [3]. Рабочая длина образца составляла  $l_p = 50$  мм, общая длина образца  $l = 150$  мм. Испытания на осевое растяжение проводили на разрывной машине INSTRON 5969 со скоростью растяжения  $V = 60$  мм/с. В ходе лабораторных испытаний на осевое растяжение образцов проволочной заготовки и тонкой проволоки после волочения определяли механические параметры: модуль упругости проволоки, условный предел текучести, предел прочности, относительное удлинение при разрыве. Результаты определения механических параметров представлены в табл. 3.

Также из табл. 3 видно, что механические характеристики проволочной заготовки в исследуемых маршрутах волочения имеют незначительные отличия, что объясняется различиями в условиях грубого и среднего волочения, в режимах патентирования и масштабным фактором проволочной латунированной заготовки.

Табл. 3

Результаты определения механических параметров

Механические характеристики	Маршрут волочения					
	№ 1		№ 2		№ 3	
	$D = 1,98$	$d = 0,30$	$D = 1,90$	$d = 0,35$	$D = 1,77$	$d = 0,30$
Модуль упругости ( $E$ ), ГПа	176,7	202,2	185,3	203,9	176,1	205,7
Условный предел текучести ( $\sigma_s$ ), МПа	889,2	3132,8	879,5	2853,6	886,02	3077,1
Предел прочности ( $\sigma_b$ ), МПа	1284,3	3376,1	1274,5	3056,3	1271,8	3235,6
Максимальное удлинение при растяжении ( $A_5$ ), %	8,30	2,64	7,90	2,42	7,95	2,27

Примечание:

$D$  — диаметр проволочной заготовки, мм;

$d$  — диаметр тонкой проволоки, мм.

Относительные изменения механических характеристик в каждом маршруте волочения представлены в табл. 4. Относительное изменение условного предела текучести и предела прочности оценивали по отношению  $\sigma_y/\sigma_b$  в тонкой проволоки и в проволочной заготовки. На основании полученных данных проведен анализ изменения исследуемых механических параметров. Результаты представлены в табл. 4.

Табл. 4

Относительное изменение механических характеристик проволоки в процессе волочения, %

Механические характеристики	Маршрут волочения		
	№1	№2	№3
$\Delta E$	14,43	10,04	16,81
$\Delta\sigma_y/\sigma_b$	34,01	35,30	36,51
$\Delta l$	-68,19	-69,37	-71,45

Анализ табл. 4 показывает, что отношение  $\sigma_y/\sigma_b$  увеличилось в среднем на 35 % во всех маршрутах волочения, а относительное удлинение уменьшилось в среднем на 70 %. Модуль упругости увеличился в среднем на 13,67 %.

Влияния параметров маршрута волочения на относительное изменение пластических характеристик оценивали с помощью коэффициента корреляции  $R$  [4].

$$R = \frac{\sum (X_j - \bar{X})(Y_j - \bar{Y})}{\left[ \left[ \sum (X_j - \bar{X})^2 \right] \left[ \sum (Y_j - \bar{Y})^2 \right] \right]^{1/2}}, \quad (1)$$

где  $X_j, Y_j$  — параметры маршрутов волочения и относительное изменение механических характеристик проволоки в процессе тонкого волочения.

Результаты оценки представлены в табл. 5.

В табл. 5 для значений относительных изменений механических параметров проволоки используются формулы:

$$\Delta E = E^d / E^D \quad (2)$$

$$\Delta \frac{\sigma_y}{\sigma_s} = \frac{\left( \frac{\sigma_y^d}{\sigma_s^d} \right)}{\left( \frac{\sigma_y^D}{\sigma_s^D} \right)} \quad (3)$$

$$\Delta A_s = A_s^d / A_s^D, \quad (4)$$

где  $E^d$  — модуль упругости тонкой проволоки после волочения, ГПа;  $\sigma_y^d / \sigma_s^d$  — модуль упругости проволоочной заготовки до волочения, ГПа;  $\sigma_y^d / \sigma_s^d$  — отношение условного предела текучести к пределу прочности при осевом растяжении тонкой проволоки после волочения;  $\sigma_y^D / \sigma_s^D$  — отношение условного предела текучести к пределу прочности при осевом растяжении проволоочной заготовки до волочения.  $A_s^d$  — относительное удлинение при осевом растяжении тонкой проволоки после волочения, %;  $A_s^D$  — относительное удлинение при осевом растяжении проволоочной заготовки до волочения, %.

Табл. 5

Корреляционная матрица,  $R$

Относительное изменение механических параметров проволоки	$T$ (°C)	$V_s$ (м/с)
$\Delta E$	0,4374	0,5931
$\Delta \sigma_y / \sigma_s$	0,9931 ( $p = 7,5$ )	0,9555 ( $p = 19,1$ )
$\Delta A_s$	-0,9982 ( $p = 3,8$ )	-0,9926 ( $p = 7,8$ )

Примечание:  $p$  — вероятность ошибки, %

Анализ табл. 5 показывает, что изменение относительного удлинения проволоки ( $\Delta A_s$ ) и отношения  $\Delta \sigma_y / \sigma_s$  в большей степени вызвано максимальной температурой поверхности проволоки в маршруте волочения ( $T$ ). Скорость волочения оказывает влияние на формирование только относительного удлинения проволоки. Из этого следует вывод, что относительное удлинение проволоки является наиболее чувствительной характеристикой механических свойств тонкой проволоки.

Из табл. 5 видно, что коэффициенты корреляции изменения модуля упругости минимальны. Следовательно, параметры маршрутов волочения оказывают слабое влияние на относительное изменение модуля упругости. Это дополнительно подтверждает то, что модуль упругости является одной из наиболее стабильных механических характеристик металлов [5]. Это позволяет сделать предположение о том, что модуль упругости не зависит от параметров маршрутов волочения.

На основании выявленных связей между режимами волочения проволоки и ее механическими свойствами произведена аппроксимация значений относительного изменения механических свойств тонкой проволоки в процессе волочения в зависимости от режимов маршрутов волочения. В результате получены уравнения регрессии:

$$A_t^d = (0,32 - 0,0003 \cdot T_{n.n.}^{\max}) \cdot A_t^D \text{ с точностью } p = 3,8 \%; \quad (5)$$

$$A_t^d = (0,35 - 0,004 \cdot V_n^{\max}) \cdot A_t^D \text{ с точностью } p = 7,8 \%; \quad (6)$$

$$\frac{\sigma_t^d}{\sigma_n^d} = (1,2 - 0,00024 \cdot T_{n.n.}^{\max}) \cdot \frac{\sigma_t^D}{\sigma_n^D} \text{ с точностью } p = 7,5 \%; \quad (7)$$

где  $T_{n.n.}^{\max}$  — максимальная температура поверхности проволоки в маршруте волочения, °С;  $V_n^{\max}$  — максимальная скорость волочения проволоки в маршруте волочения, м/с.

Полученные уравнения регрессии (5–7) позволяют с определенной точностью прогнозировать влияние режимов волочения на изменение пластических характеристик тонкой углеродистой латунированной проволоки в процессе тонкого волочения.

Уравнение (5) определяет наибольшую степень влияния температуры волочения на относительное удлинение тонкой проволоки. Уравнение (6) связывает изменение относительного удлинения со скоростью волочения, которая в свою очередь значительно влияет на температуру поверхности проволоки. Косвенное влияние скорости волочения на температуру проволоки вызывает снижение точности расчета  $A_t^d$  по формуле (6) в 2 раза по сравнению с формулой (5). Уравнение (7) также указывает на решающее влияние температуры поверхности про-

волоки на отношение условного предела текучести к пределу прочности тонкой проволоки после волочения  $\sigma_y^d / \sigma_0^d$ .

В результате проведенных исследований получены зависимости пластических характеристик тонкой лагунированной высокоуглеродистой проволоки от режимов тонкого волочения. Таким образом, при разработке маршрутов волочения этой проволоки достигнута возможность прогнозировать не только прочностные свойства проволоки, но и пластические, что позволит повысить технологичность дальнейшей переработки тонкой проволоки, прогнозировать полный комплекс ее механических свойств. Пластические параметров проволоки обеспечивает запас ее дальнейшей пластической деформации без разрушения при последующей переработке, например, при свивке в металлокорд.

#### **Список использованных источников:**

1. Бобарикин Ю.Л. Температурно-деформационный критерий оптимизации маршрутов волочения тонкой высокоуглеродистой проволоки \ Ю.Л. Бобарикин, С.В. Авсейков, А.В. Веденеев, И.Н. Радькова // *Литье и металлургия*. — 2012. — № 3 спец. выпуск. — с. 205–208.

2. 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.

3. ASTM A 370-07a, Стандартные методы испытаний и определения для механического испытания стальной продукции.

4. Джонсон Н. Статистика и планирование эксперимента в технике и науке / Н. Джонсон, Ф. Лион; перевод с английского под ред. Э.К. Лецкого. — Москва; Мир, 1980. — 511 с.

5. Фридман Я.Б. Механические свойства металлов. ч. 1 // *М., Машиностроение*, 1974 г., 472 с.

Статья поступила в редакцию 22.04.2013 г.