



The carried out numerical experiments subject to initial and boundary conditions indicate that mathematical model of elastic-plastic characteristics of steel 90 can be used for numerical calculations of wire drawing routes for this grade of steel.

Ю. Л. БОБАРИКИН, С. В. АВСЕЙКОВ, ГГТУ им. П. О. Сухого

УДК 621.778.073

## МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ФОРМИРОВАНИЯ ПЛАСТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПРОВОЛОКИ ИЗ СТАЛИ 90 ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОМ ВОЛОЧЕНИИ

### Введение

Высокоскоростное волочение – это многофакторный физический процесс деформирования проволоки. В процессе высокоскоростного волочения проволока приобретает механические свойства, зависящие от технологических особенностей холодной деформации в процессе волочения. К этим особенностям можно отнести суммарную истинную деформацию, скорость деформации и температуру проволоки в очаге деформации, выделяемую от внутреннего и контактного трения. Правильное описание влияния различных факторов на механические свойства деформируемого материала – важное условие математического моделирования.

Стандартной методикой оценки механических свойств являются испытания на разрывной машине. Такая методика позволяет зафиксировать сформированные после волочения свойства проволоки.

При статическом нагружении на разрыв уже деформированной проволоки наблюдается значительное увеличение прочности по сравнению с недеформированной проволокой. Увеличение прочности объясняется «наследованием» механических свойств проволоки в процессе волочения. Прочностные испытания готовой проволоки на растяже-

ние, проводимые при скоростях деформирования образцов  $0,4-0,001 \text{ с}^{-1}$ , учитывают статическое упрочнение и остаточное динамическое упрочнение (табл. 1).

Пределы текучести и прочности проволоки в очаге деформации при волочении (динамическое нагружение) выше значений, полученных при растяжении (статическое нагружение) протянутой проволоки на разрывной машине, и называются соответственно динамическими  $\sigma_s^d$  и статическими  $\sigma_s^{st}$  [3].

Зависимость для математического описания пластических свойств металлов в системах инженерного анализа (CAE), которые основаны на вычислениях с помощью математических алгоритмов, реализуемых методом конечных элементов, имеет вид [1–3, 5, 6]:

$$\sigma_s^d = f(\varepsilon_p, \dot{\varepsilon}_p, T), \quad (1)$$

где  $\varepsilon_p$  – пластическая деформация;  $\dot{\varepsilon}_p$  – скорость пластической деформации,  $\text{с}^{-1}$ ;  $T$  – температура,  $^{\circ}\text{C}$ .

Зависимость  $\sigma_s^{st} = f(\varepsilon_p, T)$  будет описывать влияние температуры на статический предел текучести. Ее можно получить на основании испытаний на разрыв.

Таблица 1. Параметры процессов деформирования

Вид нагружения	Процесс деформирования	Скорость деформации, $\text{с}^{-1}$	Характер упрочнения в очаге деформации	
			без предварительного нагрева ( $20^{\circ}\text{C}$ )	с учетом температурного влияния ( $>20^{\circ}\text{C}$ )
Статическое нагружение	Деформация на разрывной машине	$< 10$	Деформационное упрочнение	Деформационное упрочнение с преобладающим температурным разупрочнением
Динамическое нагружение	Волочение	$>10-10000$	Температурное разупрочнение с преобладающим динамическим и деформационным упрочнением	

Для высокоскоростных процессов деформирования наибольшее распространение получили следующие зависимости для описания динамического упрочнения [1, 5, 6]:

модель Джонсона-Кука:

$$\sigma_s^d / \sigma_s^{ct} = f \left( 1 + C \left( \frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_p^0} \right) \right); \quad (2)$$

модель Чао-Вонга:

$$\sigma_s^d / \sigma_s^{ct} = f \left( C_1 + C_2 \left( \frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_p^0} \right) + C_3 \cdot \log \left( \frac{\dot{\epsilon}_p}{\dot{\epsilon}_p^0} \right) \right); \quad (3)$$

модель Симонда-Купера:

$$\sigma_s^d / \sigma_s^{ct} = f \left( 1 + \frac{\dot{\epsilon}_p}{C} \right)^{\frac{1}{p}}. \quad (4)$$

В диапазоне скоростей деформирования 0,01–10 с<sup>-1</sup> эти зависимости незначительно отличаются. Для процессов с высокими скоростями деформации (> 10 с<sup>-1</sup>) наиболее приемлемы модели Чао-Вонга и Симонда-Купера, так как они точнее описывают высокоскоростное деформирование для большинства металлов [6]. Модель Симонда-Купера является универсальной для ряда сталей в высокоскоростных диапазонах нагружения в отличие от других моделей.

Таким образом, используя экспериментальную зависимость  $\sigma_s^{ct} = f(\epsilon_p, T)$  статического предела текучести и модель динамического упрочнения Симонда-Купера (4), представляется возможным математическое описание формирования пластических свойств высокопрочной стали 90 в процессе высокоскоростного волочения проволоки в виде

$$\sigma_s^d = f(\epsilon_p, T) \left( 1 + \frac{\dot{\epsilon}_p}{C} \right)^{\frac{1}{p}}, \quad (5)$$

где  $\epsilon_p$  – пластическая деформация;  $\dot{\epsilon}_p$  – скорость пластической деформации, с<sup>-1</sup>;  $T$  – температура, °С;

$C, p$  – коэффициенты, описывающие характер динамического упрочнения.

### Анализ исходных экспериментальных данных и формулировка закона упрочнения проволоки из стали 90 для математического моделирования

Повышение предела текучести от 913 до 3000 МПа стали 90 после высокоскоростного волочения объясняется не только деформационным, но и динамическим упрочнением, часть которого сохраняется после волочения [2].

В заводских условиях были проведены механические испытания проволоки (табл. 2).

Из таблицы видно, что запас пластичности после волочения уменьшился, но при этом увеличился предел прочности почти в 3 раза, что объясняется остаточным динамическим упрочнением. Однако, как известно из [2, 4, 5], температура при статическом нагружении снижает прочность стали. Испытания, проводимые на разрывной машине INSTRON5567, этой же проволоки, но с предварительным нагревом до 300 °С подтверждают этот факт (табл. 3).

Из заводских испытаний известно, что отношение предела текучести к пределу прочности при статическом нагружении  $K_\sigma = \sigma_s^{ct} / \sigma_B^{ct}$  имеет для проволоки диаметром 1,94 и 0,349 мм пропорциональную зависимость 0,701 и 0,92. Влияние температурного фактора проводили по пределу прочности на разрыв с целью получения более точных значений предела текучести. Оценку влияния температуры проводим по отношению предела прочности при 300 °С к пределу прочности при 20 °С:

$$K_T = \sigma_B^{300} / \sigma_B^{20}. \quad (6)$$

Из таблицы видно, что температурное разупрочнение проволоки из стали 90 увеличивается с ростом деформационного и остаточного динами-

Т а б л и ц а 2. Результаты заводских испытаний проволоки на разрыв

Диаметр проволоки, мм	Длина образца, мм	Скорость растяжения, мм/мин	Температура испытания, °С	Условный предел текучести, МПа	Предел прочности на разрыв, МПа	$K_\sigma = \frac{\sigma_s^{ct}}{\sigma_B^{ct}}$
1,94	250	25,4	20	913	1302	
				914	1302	
				915	1301	
				910	1302	
Среднее значение				913	1301,75	0,701
0,349	250	25,4	20	2884	3155	
				2893	3150	
				2874	3177	
				2975	3173	
Среднее значение				2906,5	3163,75	0,92

Т а б л и ц а 3. Результаты испытаний проволоки на разрыв при 20 и 300 °С

Скорость растяжения, мм/мин		Диаметр 1,94 мм			Диаметр 0,349 мм		
		10	25,4	500	10	25,4	500
Предел прочности, МПа (заводские испытания при 20 °С)		1301,75			3163,75		
Предел прочности, МПа (INSTRON 5567)	20 °С	1311,95		1327,44	3271,93		2622,08
		1312,06		1327,00	2912,57		2678,94
		1312,39		1325,75	2879,29		3346,47
		–		–	3249,02		–
	Среднее	1312,13		1326,73	3078,20		2882,50
	300 °С	1249,06		1244,07	2400,08		2666,34
		1264,99		1243,63	2432,66		2494,64
		1232,99		1240,34	2251,05		2471,81
–			–	–		–	
Среднее	1249,01		1242,68	2361,26		2544,26	
Температурный коэффициент $K_T$		0,952		0,9366	0,727		0,883
		0,944			0,805		
Предел прочности при 300 °С, МПа		1228,85			2546,82		
Предел текучести при 300 °С, МПа		860,19			2339,73		

ческого упрочнения. Этот вывод можно сделать, сравнивая значения температурного коэффициента  $K_T$  для волочения проволок диаметром 1,94 и 0,349 мм.

На повышение прочности проволоки при высокоскоростном волочении в значительной степени оказывает влияние динамическое упрочнение, так как при высоких скоростях деформирования высокая температура (450–550 °С), образующаяся от контактного трения на поверхности проволоки за короткие промежутки времени (0,1–0,001 с<sup>-1</sup>), не оказывает существенного разупрочняющего эффекта. Быстрый нагрев и охлаждение высокоуглеродистой проволоки оказывают влияние на структурные превращения углерода на поверхности проволоки, что в сумме с остаточным динамическим упрочнением ведет к потере пластичности [4].

По результатам статического нагружения (рис. 1, табл. 2, 3) было получено уравнение, позволяющее оценить влияние температуры и деформационного упрочнения в процессе высокоскоростного волочения:

$$\sigma_s^{cr} = f(\epsilon_p, T) = 916,7721 + 591,8984\epsilon_p - 0,1886T - 0,5352\epsilon_p T. \quad (7)$$

Так как часть динамического упрочнения уже учтена в уравнении (6), то, используя зависимость Симонда-Купера, можно вычислить предел текучести в очаге деформации с учетом динамического упрочнения:

$$\sigma_s^n = (916,7721 + 591,8984\epsilon_p - 0,1886T - 0,5352\epsilon_p T) \left( 1 + \left( \frac{\dot{\epsilon}_p}{1 \cdot 10^7} \right)^{\frac{1}{13,288}} \right), \quad (8)$$

где  $\epsilon_p$  – пластическая деформация;  $\dot{\epsilon}_p$  – скорость пластической деформации, с<sup>-1</sup>;  $T$  – температура, °С;  $C, p$  – коэффициенты, описывающие характер динамического упрочнения:  $C = 1 \cdot 10^7, p = 13,288$ .

Коэффициенты  $C$  и  $p$  были выбраны с учетом частичного упрочнения проволоки и характерны для большинства углеродистых сталей [6].

### Результаты численного эксперимента

Для проведения численного эксперимента модели упругопластических свойств проволоки из

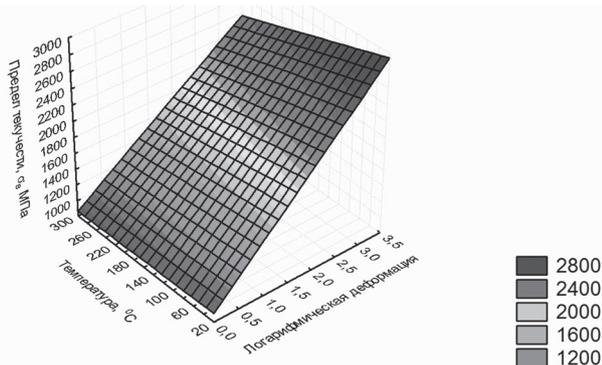


Рис. 1. График поверхности для функции  $\sigma_s^{cr} = f(\epsilon_p, T)$

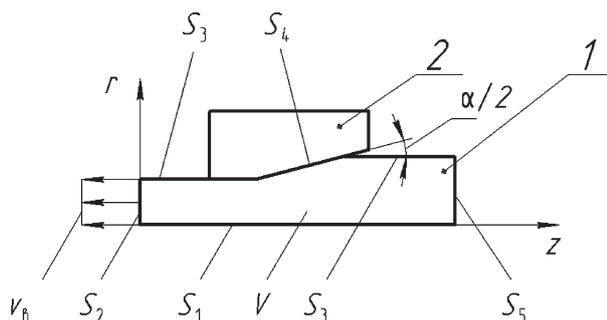


Рис. 2. Схема процесса волочения проволоки: 1 – проволока; 2 – волока;  $V_b$  – скорость волочения;  $\alpha$  – угол деформирующей зоны волоки;  $S_i$  – граничные поверхности,  $i = 1-5$ ;  $V$  – область очага деформации;  $r, z$  – координатные оси

стали 90 при высокоскоростном волочении использовали математическую модель процесса волочения, описанную в [7] (рис. 2).

Основной целью численного эксперимента является получение заключения о правильности модели упругопластических свойств проволоки из стали 90 при волочении, поэтому сравнение проводили с результатами эксперимента по волочению проволоки с аналогичными параметрами на волочильном стенде.

Эксперименты серии А соответствуют параметрам заводского маршрута волочения проволоки диаметром 0,412 мм из заготовки диаметром 2,45 мм с конечной скоростью волочения 5 м/с, а серии В – диаметром 0,349 мм из заготовки диаметром 1,94 мм с конечной скоростью волочения 12 м/с в условиях РУП «БМЗ».

Из табл. 4 видно, что сила волочения уменьшается при увеличении скорости волочения. Это свидетельствует о том, что общая тенденция получен-

ной упругопластической модели верна. Однако в некоторых экспериментах относительная погрешность составляет более 10% (табл. 5).

Из сравнения экспериментальных данных с расчетными (табл. 5) видно, что принятые допущения в граничных и начальных условиях для математических моделей упрочнения проволоки из стали 90 и волочения вносят погрешность вычисления. Анализ значений  $P_{\text{экс}}$  показывает, что с ростом скорости волочения их величина уменьшается относительно  $P_{\text{расч}}$ . Это явление можно объяснить тем, что при расчете коэффициент контактного трения принят постоянным  $f = 0,05$ . В действительности, его величина уменьшается с ростом скорости волочения, способствующей более устойчивому гидродинамическому захвату жидкой смазки.

### Выводы

Результаты проведенных численных экспериментов с учетом начальных и граничных условий позволяют судить о том, что математическая модель упругопластических свойств проволоки из стали 90 отражает влияние основных параметров высокоскоростного волочения и может использоваться для численных расчетов маршрутов волочения для этой марки стали. Данная математическая модель позволяет изучить напряженно-деформированное состояние и распределение температур в очаге деформации с помощью компьютерных систем инженерного анализа (САЕ), которые основаны на вычислениях с помощью математических алгоритмов, реализуемых методом конечных элементов.

Т а б л и ц а 4. Сравнение результатов численного эксперимента

Номер серии экспериментов	Диаметр проволоки $D$ , мм	Скорость волочения $V$ , м/с	Суммарная деформация $\Sigma \epsilon$	Сила волочения экспериментальная $P_{\text{экс}}$ , Н	Сила волочения расчетная $P_{\text{расч}}$ , Н	Температура поверхности проволоки	
						в начале калибрующей зоны $T_{\text{цил.н}}$	в конце калибрующей зоны $T_{\text{цил.к}}$
A1	2,23	0,17	0,19	1846,66	1860	141	118
A5	1,5	0,38	0,98	1109,61	1277	207	183
A11	0,85	1,17	2,12	438,1	591	311	287
B1	1,748	0,47	0,208	1295	1207	167	141
B2	1,575	0,59	0,417	1150	1175	200	167

Т а б л и ц а 5. Вычисление погрешности численного эксперимента

Номер серии эксперимента	Скорость волочения $V$ , м/с	Сила волочения экспериментальная $P_{\text{экс}}$ , Н	Сила волочения расчетная $P_{\text{расч}}$ , Н	Относительная погрешность $\Delta$ , %
A1	0,17	1846,66	1860	-0,73
A5	0,38	1109,61	1277	-13,11
A11	1,17	438,1	591	-25,87
B1	0,47	1295	1206	7,31
B2	0,59	1150	1175	-2,15

**Литература**

1. Soderberg A., Ulf Sellgren. Modelling of strain hardening and strain rate hardening of dual phase steels in finite element analysis.
2. Bayraktar E., Levaillant C., Altintas S. Strain rate and temperature effect on the deformation behavior of the original hadfield steel // J. de physique. 1993.
3. Hu Yu-gun, Zhao Ya-pu. Scale effect of plastic strain rate // Chinese journal of aeronautics. 2001. N 14–1.
4. Smallman R. E, Bishop R. J. Modern Physical Metallurgy and Materials Engineering. Sixth edition. 1999.
5. Vaynman S., Fine M. E., Lee S., Espinosa H. D. Effect of strain rate and temperature on mechanical properties and fracture mode of high strength precipitation hardened ferritic steels. 2006.
6. Yuh J. Chaо. A new material constitutive model for high strain rate behavior of metals. 2009.
7. Верещагин М. Н., Бобарикин Ю. Л., Савенок А. Н., Веденеев А. В., Целуев М. Ю., Игнатенко О. И. Влияние скорости волочения на температуру и напряженно-деформированное состояние в проволоке из высокоуглеродистой стали // Литье и металлургия. 2008. № 1.