

## ВЛИЯНИЕ ПЛЮЩЕНИЯ НА ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В СТАЛЬНОЙ КРУГЛОЙ ПРОВОЛОКЕ

Г.Е. Коджаспиров, Н.Н. Павлов, Ю.И. Рыбин, И.В. Житников

*Санкт-Петербургский Государственный Технический Университет  
195251 Санкт-Петербург Россия, Металлургический Завод "Петросталь"  
198097 Санкт-Петербург Россия*

В последнее время в России и за рубежом возрос интерес к производству узкой ленты способом плющения круглой проволоки. Данный способ отличается рядом особенностей, связанных с возникновением остаточных напряжений (растягивающих по краям), которые могут привести к растрескиванию кромок, а так же с неоднородностью течения металла в продольном направлении.

Известно, что при плющении проволоки на геометрические размеры и распределение остаточных напряжений в полосе влияет натяжение (переднее и заднее).

В данной статье приведены результаты исследований, предусматривающих проведение полного факторного эксперимента (П.Ф.Э.), с целью получения зависимости уширения  $\Delta B$  и максимальных остаточных напряжений  $\sigma_{рез}$  от основных факторов процесса прокатки (плющения) проволоки:

- диаметра (радиуса) прокатных валков  $R$ ;
- обжатия  $\Delta H$ ;
- толщины (высоты) исходной заготовки  $H_0$ ;
- переднего натяжения  $\sigma_п$ ;
- заднего натяжения  $\sigma_з$ .

П.Ф.Э. дает возможность построения единой математической модели (единой формулы), описывающей влияние исследуемых параметров процесса во всей области варьирования пяти названных факторов.

Проведенный факторный эксперимент предполагал исследование всех стадий процесса плющения проволоки. Этим он отличался от многих исследований, где результаты приводятся для полосы в окончательном состоянии.

Первоначально проводились эксперименты, по результатам которых были выбраны оптимальные диапазоны варьирования исследуемых факторов: эксперимент проводился на станах с диаметром валков 90мм и 210мм; натяжения варьировались в пределах  $\pm 0,12\sigma_s$ ; высота полосы варьировалась от исходного диаметра проволоки до  $0,7d_0$ ; диапазон варьирования относительных обжатий  $\epsilon = 10 \div 20\%$ . Выбранные диапазоны обусловлены граничными условиями, обеспечивающими устойчивый процесс прокатки.

Эти диапазоны варьирования позволили реализовать полный ортогональный план, включающий проведение  $2 \times 3 \times 3 \times 3 \times 3 = 162$  сочетаний варьируемых параметров  $r$ ,  $\epsilon$ ,  $h$ ,  $\sigma_0$ ,  $\sigma_1$ .

Зависимость предела текучести материала проволоки от обжатия показана на рис. 1

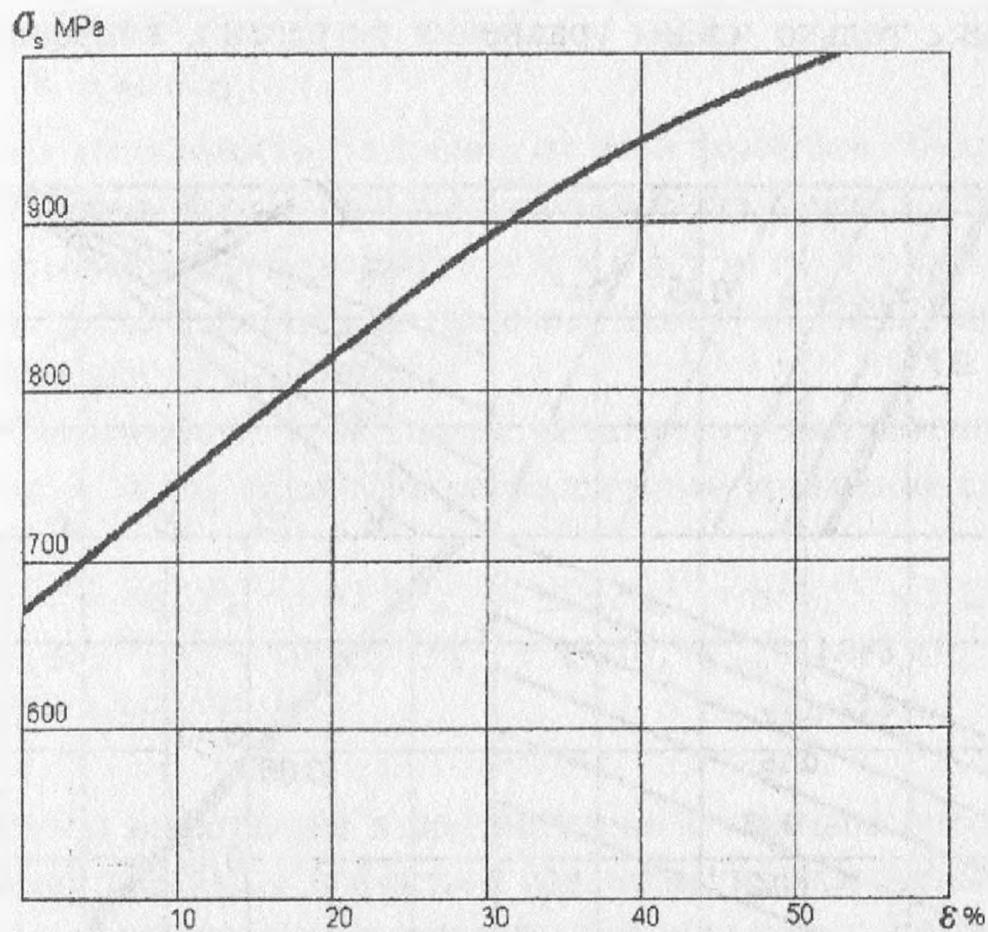


Рис. 1 Зависимость предела текучести от обжатия.

Усредненные результаты измерения уширения и вытяжки приведены в таблице.

№	г	ε %	h	σ <sub>0</sub>	σ <sub>1</sub>	B <sub>0</sub>	ΔB	ΔB/B <sub>0</sub>	λ	σ <sub>res</sub>
1	13,6	9,1	0,70	0	0	3,70	0,20	0,0541	1,030	662
2		9,1	0,70	0,113	0,113	3,70	0,14	0,0378	1,052	627
3		10,5	0,85	0	0	3,44	0,16	0,0465	1,027	536
4		9,1	0,85	0,128	0,14	3,30	0,02	0,0060	1,019	411
5		15,0	0,70	0	0	3,70	0,26	0,0703	1,047	700
6		14,1	0,85	0,114	0,121	3,44	0,21	0,0610	1,054	527
7		14,1	1,00	0	0	3,30	0,15	0,0454	1,025	507
8		20,0	0,70	0,111	0,113	3,70	0,35	0,0946	1,070	756
9		21,0	0,85	0	0	3,44	0,39	0,1134	1,057	640
10		21,2	0,85	0,120	0,140	3,30	0,21	0,0637	1,058	486
11	31,8	9,1	0,70	0	0	3,80	0,23	0,0605	1,028	627
12		9,8	0,85	0,115	0,140	3,50	0,16	0,0457	1,030	541
13		9,1	1,00	0	0	3,30	0,07	0,0212	1,011	546
14		13,0	0,70	0,117	0,112	3,80	0,31	0,0816	1,045	700
15		14,1	0,85	0	0	3,50	0,24	0,0686	1,039	590
16		13,8	0,85	0,121	0,114	3,30	0,16	0,0485	1,022	515
17		19,0	0,70	0	0	3,80	0,45	0,1184	1,060	797
18		22,8	0,85	0,111	0,120	3,50	0,40	0,1143	1,057	630
19		20,0	1,00	0	0	3,30	0,28	0,0848	1,028	596
20		20,0	1,00	0,117	0,140	3,30	0,27	0,0818	1,030	560

В результате обработки экспериментальных данных получили уравнение регрессии для уширения ( $\Delta B/B_0$ ):

$$\begin{aligned} \Delta B/B_0 = & 0,06677 + 0,00535P_r^{(1)} + 0,03073P_\varepsilon^{(1)} - 0,01621P_h^{(1)} - 0,00284P_{\sigma_0}^{(1)} - \\ & 0,00103P_{\sigma_1}^{(1)} + 0,00215P_\varepsilon^{(2)} + 0,00378P_h^{(2)} + 0,00201P_r^{(1)}P_{\sigma_0}^{(1)}. \end{aligned} \quad (1)$$

С учетом точности измерения уширения ( $\pm 0,01\text{мм}$ ) в данную аппроксимирующую формулу включены только члены уравнения регрессии, коэффициенты при которых больше 0,002.

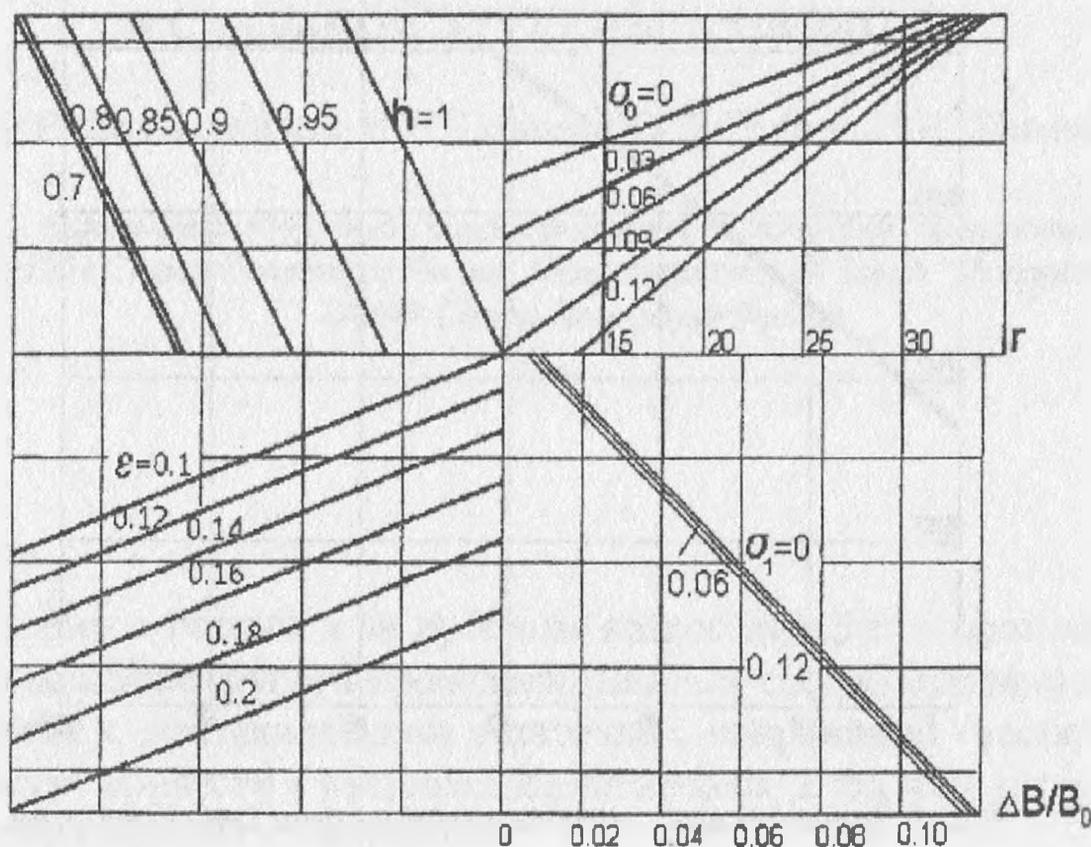


Рис. 2 Номограмма для определения относительного уширения.

Сопоставление эффектов влияния переднего натяжения  $-0,00284P_{\sigma_0}^{(1)}$  и взаимодействия  $+0,00201P_r^{(1)}P_{\sigma_0}^{(1)}$ , показывает, что при малых радиусах валков ( $P_r^{(1)} = -1$ ) переднее натяжение заметно уменьшает уширение, при больших радиусах ( $P_r^{(1)} = +1$ ) влияние переднего натяжения практически отсутствует ( $-0,00284P_{\sigma_0}^{(1)} + 0,00201P_{\sigma_0}^{(1)} = -0,00083P_{\sigma_0}^{(1)}$ ).

Для определения вытяжки ( $\lambda$ ) аппроксимирующая формула имеет вид:

$$\begin{aligned} \lambda = & 1,0399 - 0,0050P_r^{(1)} + 0,0142P_\varepsilon^{(1)} - 0,0113P_h^{(1)} + \\ & + 0,00294P_{\sigma_0}^{(1)} + 0,00119P_{\sigma_1}^{(1)} - 0,00287P_h^{(2)} - \\ & - 0,00201P_r^{(1)}P_{\sigma_0}^{(1)} - 0,00147P_r^{(1)}P_\varepsilon^{(1)} - 0,00126P_\varepsilon^{(1)}P_h^{(1)}. \end{aligned} \quad (2)$$

Взвешивание образцов производилось с точностью 0,01г; это давало при вычислении вытяжки точность до 0,001. Соответствующие эффекты включены в формулу  $\lambda$ .

Обработка результатов экспериментов, проведенных по полному плану, выполнялась с переходом от исходных значений варьируемых параметров к нормированным величинам (0, 1, 2) и далее к ортогональным полиномам Чебышева, которые фигурируют в формулах вместо натуральных значений  $r$ ,  $\varepsilon$ ,  $h$ ,  $\sigma_0$ ,  $\sigma_1$ . Ортогональные полиномы Чебышева связаны с натуральными значениями варьируемых параметров следующими соотношениями:

$$P_r^{(1)} = 0,1099r - 2,4945;$$

$$P_\varepsilon^{(1)} = 20\varepsilon - 3;$$

$$P_\varepsilon^{(2)} = 25 - 360\varepsilon + 1200\varepsilon^2;$$

$$P_h^{(1)} = 6,6667h - 5,5667;$$

$$P_h^{(2)} = 94,3333 - 226,6667h + 133,3333h^2;$$

$$P_{\sigma_0}^{(1)} = 16,6667\sigma_0 - 1;$$

$$P_{\sigma_1}^{(1)} = 16,6667\sigma_1 - 1.$$

Представленная зависимость уширения от пяти факторов обнаруживает линейный и квадратичный эффекты факторов  $\varepsilon$  и  $h$  линейную зависимость от переднего натяжения и парные взаимодействия факторов  $\varepsilon$  и  $h$ ,  $r$  и  $h$ ,  $r$  и  $\sigma_0$ , что полностью согласуется с существующими представлениями о процессе прокатки. Влияние заднего натяжения оказалось статистически не значимым.

Для описания зависимости продольных остаточных напряжений  $\sigma_{z \text{ рез}}$  от относительных величин  $r$ ,  $\varepsilon$ ,  $h$ ,  $\sigma_0$ ,  $\sigma_1$  получили регрессионное уравнение следующего вида:

$$\begin{aligned} \sigma_{z \text{ рез}} = & 600 + 18,5P_r^{(1)} + 48,1P_\varepsilon^{(1)} - 97,9P_h^{(1)} - 12,6P_{\sigma_0}^{(1)} - 6P_{\sigma_1}^{(1)} + 5,8P_\varepsilon^{(2)} + \\ & + 12,5P_h^{(2)} - 2,8P_r^{(1)}P_\varepsilon^{(1)} + 10,5P_r^{(1)}P_h^{(1)} + 4,45P_r^{(1)}P_{\sigma_0}^{(1)} - 17,4P_\varepsilon^{(1)}P_h^{(1)} - \\ & - 6,3P_h^{(1)}P_{\sigma_0}^{(1)} - 3,3P_h^{(1)}P_{\sigma_1}^{(1)}. \end{aligned} \quad (3)$$

Численные расчеты выполнены в соответствии с полным ортогональным планом  $2 \times 3 \times 3 \times 3 \times 3 = 162$ . Менее значимые эффекты в уравнение не включены. Данное уравнение справедливо только в пределах диапазона варьирования независимых переменных:

$$r = 13,6 \div 31,8;$$

$$\varepsilon = 0,1 \div 0,2;$$

$$h = 0,7 \div 1;$$

$$\sigma_0 = 0 \div 0,12\sigma_s;$$

$$\sigma_1 = 0 \div 0,12\sigma_s.$$

и только для условий прокатки проволоки из заданной марки стали на одноклетьевых станах. Очевидно, распространять полученные зависимости на прокатку в многоклетьевых станах с натяжением нельзя, ибо по условиям эксперимента разгрузка прокатываемой заготовки производится после каждого прохода.

Из уравнения (3) следует, что наиболее значимым фактором в исследованном диапазоне варьирования независимых переменных является исходная высота полосы  $h = h_0 D_0$ . Это связано, в первую очередь, с увеличением предела текучести по мере уменьшения относительной высоты заготовки (знак "-" перед  $P_h^{(1)}$  в уравнении регрессии).

Фактор  $\varepsilon$  – второй по значимости. С увеличением обжатия увеличивается предел текучести металла на выходе из валков, увеличиваются напряжения в очаге деформации, и, следовательно, увеличиваются остаточные напряжения (знак "+" перед  $P_\varepsilon^{(1)}$  в уравнении регрессии) при прочих равных условиях.

По мере увеличения обжатия  $\varepsilon$  и уменьшения высоты  $h$ , эффект их взаимодействия ( $-17,4P_\varepsilon^{(1)}P_h^{(1)}$ ) будет приводить к интенсификации роста остаточных напряжений.

С увеличением радиуса валка увеличивается длина очага деформации  $l = \sqrt{R\Delta h}$ , возрастает общий уровень напряжений, т.е. фактор  $r$  оказывает на напряженное состояние влияние, аналогичное влиянию обжатия  $\Delta h$ . Однако такая закономерность сохраняется в достаточно узком диапазоне значений  $r$ ,  $h$ ,  $\varepsilon$ . По мере нарастания обжатия и уменьшения высоты  $h$  эффекты их взаимодействия с фактором  $r$  ( $+10,5P_r^{(1)}P_h^{(1)} - 2,8P_r^{(1)}P_\varepsilon^{(1)}$ ) могут сделать влияние радиуса валков на остаточные напряжения иным, т.е. с возрастанием  $r$  напряжения могут уменьшаться. Это объясняется тем, что с возрастанием  $r$  и, следовательно, длины очага деформации, последний переходит в катего-

рию длинных ( $1/h \gg 1$ ), где деформации распределяются равномерно и исчезает основная причина формирования остаточных напряжений. Указанный характер зависимости находится за пределами исследованного нами интервала варьирования факторов.

В исследованной области варьирования параметров прокатки переднее и заднее натяжения снижают остаточные напряжения (знак "--" перед  $P_{\sigma_0}^{(1)}$  и  $P_{\sigma_1}^{(1)}$  в уравнении регрессии). Натяжение полосы снижает неравномерность напряжений  $\sigma_y$  по сечению, т.е. снижает (по абсолютной величине) контактные напряжения и напряжения во всем объеме. За счёт продольной растягивающей нагрузки снижается (по абсолютной величине) уровень сжимающих продольных напряжений в очаге деформации. Растягивающие продольные напряжения в боковых внешних зонах остаются практически неизменными и примерно равными пределу текучести (на боковой поверхности, где  $\sigma_x = 0$ , имеем плоское напряженное состояние и условие пластичности в виде  $\sigma_z - \sigma_x = \sigma_s$ ).

При снятии внешней нагрузки (выходе металла из валков и снятии напряжения) полоса становится несколько толще, но уже и короче. Расчеты показывают, что в случае прокатки с натяжением продольное укорочение при снятии нагрузки существенно больше, чем при прокатке без натяжения. Чем больше продольное укорочение, тем заметнее снижаются продольные напряжения (тем полнее происходит разгрузка с выравниванием напряжений).

Из уравнения регрессии следует, что этот механизм формирования остаточных напряжений не является единственным. Велики эффекты взаимодействия факторов  $r \times \sigma_0$ ,  $h \times \sigma_0$ ,  $h \times \sigma_1$ . С увеличением радиуса валков и по мере уменьшения высоты полосы  $h$  влияние натяжения уменьшается и может привести к обратному влиянию натяжения на остаточные напряжения.

Таким образом, полный факторный эксперимент позволил выявить не только влияние отдельных факторов на остаточные напряжения, но и проанализировать их взаимодействие. Оказалось, что однозначное влияние на остаточные напряжения оказывает только суммарное обжатие (в данном случае, факторы  $\epsilon$  и  $h$  и их взаимодействие). Остальные факторы в зависимости от их сочетания могут приводить как к увеличению, так и к уменьшению напряжений.

### Список литературы

1. C.A. Brebbia, J.C.F. Telles, L.C. Wroubel. Boundary element techniques. Theory and application in engineering. Springer -Verlag. Berlin Heidelberg New-York Tokio, 1984.
2. S.P. Timochenko, J.N. Goodier. Theory of elasticity. McGraw-Hill, New York, 1970.
3. O.C. Zienkiewicz. The finite element method in engineering science. McGraw-Hill, London, 1971.
4. М.И. Злотников. Производство плющеной ленты. Metallurgizdat, 1951.